

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Igor Cigić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Davor Ljubas, dipl. ing.

Student:
Igor Cigić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru rada prof. dr. sc. Davoru Ljubasu na usmjeravanju prilikom izrade ovoga rada te na korisnim savjetima. Također se zahvaljujem dr.stom. Gordani Kos koja je nesebično ustupila dio svoje stomatološke opreme u svrhu izrade ovog rada.

Igor Cigić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA	2
POPIS DIJAGRAMA	3
SAŽETAK	4
1. OSNOVNA NAČELA PODMAZIVANJA	5
1.1 Značenje podmazivanja	5
1.2 Trenje	5
1.3 Podmazivanje kapljevinama	7
1.4 Hidrodinamičko podmazivanje	9
1.5 Granično podmazivanje	11
1.6 Tlačno podmazivanje	11
1.7 Suho ili kruto podmazivanje	12
1.8 Trošenje	12
1.9 Hlađenje	12
1.10 Sprječavanje korozije	13
2. ODABIR TIPMAZIVA	14
2.1 Podmazivati ili ne	14
2.2 Problem kod izbora maziva	15
2.3 Osnovni tipovi maziva	16
2.4 Odabir tipa maziva	17
2.5 Odabir maziva za određenu vrstu komponenata	18
2.5.1. Klizni ležaj	19
2.5.2 Kuglični ležaj	19
2.5.3 Zatvoreni zupčanci	19
2.5.4 Parne turbine	19
2.5.5 Otvoreni prijenosi, konopci i lanci	20
2.5.6 Satovi i osovine instrumenata	20
3. KRUTA MAZIVA	21
3.1 Prednosti i nedostaci krutih maziva	24
3.2 Grafit	25

3.3	Molibden disulfid i slične komponente.....	28
3.4	Ostala anorganska kruta maziva	32
3.5	PTFE i slični polimeri.....	32
3.6	Najlon	35
3.7	Acetali.....	37
3.8	Polietereterketoni (PEEK).....	37
3.9	Metali kao kruta maziva	38
3.10	Kompoziti	39
3.11	Dijamant kao ugljik (DLC – Diamondlikecarbon)	40
3.12	Odabir krutih maziva	40
3.13	Konstruiranje krutih maziva.....	41
3.14	Vijek trajanja.....	41
3.15	Primjena krutih maziva	42
3.16	Neke primjene krutih maziva	43
3.17	Klizni ležajevi	43
3.18	Kuglični ležajevi.....	43
3.19	Zupčanici	44
4.	PLINOVITA MAZIVA.....	45
4.1	Svojstva plinova kao maziva	46
4.2	Prednosti i nedostaci plinskih ležajeva	48
4.3	Primjeri primjene plinskih ležajeva	48
4.3.1	Zubarska brusilica.....	48
5.	ZAKLJUČAK.....	51
6.	POPIS LITERATURE	52

POPIS SLIKA

Slika 1.2. Podmazivanje rukavca kliznog ležaja

Slika 1.3 Tlačni klin kod klizog ležaja

Slika 1.4 Elastodinamičko podmazivanje cilindra na ravnoj površini

Slika 3.1 Slojevitost struktura mnogih krutih maziva

Slika 3.2 Heksagonalna rešetkasta struktura grafita

Slika 3.3 Prijenos maziva između zupčanika

Slika 4.1 Povećanje viskoznosti plina sa povećanjem temperature

Slika 4.2 Bezuljni kompresor

Slika 4.3 Raspored elemenata u kućištu turbine

Slika 4.4 Jednokratno podmazivanje specifičnim mazivom u obliku spreja

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Svojstva osnovnih tipova maziva

Tablica 2.1 Zahtjevi različitih komponenata

Tablica 3.1 Neki materijali koji se koriste kako kruta maziva

Tablica 3.1 Neke grafitne disperzije

Tablica 3.2 Molibden disulfidnih filmova

Tablica 3.3 Karakteristike nekih anorganskih krutih maziva

Tablica 3.4 Neki komercijalni PTFE kompoziti

Tablica 3.5 Svojstva nekih fluoriranih polimera

Tablica 3.6 Osobine različitih najlona

Tablica 3.7 Svojstva nekih metalnih maziva

Tablica 3.8 Materijali korišteni u kompozitnim mazivima

Tablica 3.9 Približne maksimalne vrijednosti brzine i opterećenja krutih maziva

Tablica 4.1 Kritične temperature i trojne točke

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1.1 Stribeckova krivulja

SAŽETAK

Plinovi i krute tvari mogu se koristiti za podmazivanje slično kao i kapljevita maziva, no njihova primjena je prilično ograničena i specifična. Primjena krutih i plinovitih maziva najčešće se odnosi na ekstremne okolišne uvjete (ekstremne temperature, kemijski agresivna okolina...). U takvim slučajevima odabire se podmazivanje krutim i plinovitim mazivima, posebno ako je time moguće izbjeći postavljanje novih zahtjeva na konstrukciju. Unatoč specifičnostima primjene i njezinoj ograničenosti, prednosti plinovitih i krutih maziva mogu se zanemariti i danas predstavljaju izazov u istraživanjima i konstrukciji strojeva i strojnih elemenata.

Kroz ovaj rad dan je prikaz danas korištenih plinovitih i krutih maziva. Objašnjena su njihova svojstva i načini nanošenja na strojne elemente koje treba podmazivati i naveden je primjer iz prakse – podmazivanje zrakom ležajeva turbine zubarskog alata.

1. OSNOVNA NAČELA PODMAZIVANJA

1.1 Značenje podmazivanja

Pravilan izbor i primjena maziva su lakši, uz razumijevanje osnovne teorije. U ovom radu je objašnjena upravo osnovna teorija podmazivanja specifičnih područja podmazivanja – pomazivanje plinom i podmazivanje krutim tvarima.

Općenito, kad se jedna površina giba u odnosu na drugu, uvijek postoji otpor gibanju i sila koja se suprotstavlja gibanju, a zove se trenje. Ako je trenje slabo i konstantno, klizanje će biti mirno i jednostavno. U drugoj krajnosti trenje može biti tako veliko, ili tako neujednačeno, da gibanje postane nemoguće ili se površine mogu pregrijati ili se mogu ozbiljno oštetiti. Podmazivanje je jednostavno korištenje materijala kako bi se poboljšala glatkoća gibanja jedne površine u odnosu na drugu, a materijal koji je to omogućio zove se mazivo. Maziva su uglavnom kapljevine, ali mogu biti i krutine ili plinovi ili bilo koja kombinacija krutina i tekućina. Općenito govoreći, glatkoća gibanja se poboljšava smanjivanjem trenja, no to nije uvijek slučaj. Postoje situacije u kojima je bitnije održati ravnomjerno trenje nego postići najmanje moguće trenje. Neki od primjera su: sprječavanje udaranja kod strojeva za drobljenje, eliminacija škripanja kočnica ili eliminacija drhtanja spojke u automobilu. Uz smanjenje ili kontrolu trenja, od maziva se očekuje da smanje trošenje materijala i često da spriječe pregrijavanje i koroziju materijala. [1], [2], [3].

1.2 Trenje

U najviše slučajeva suho trenje između dva tijela usko slijedi dva zakona koje obično zovu Amontonovi zakoni, iako ih je u stvari prvi objasnio Leonardo da Vinci oko 1500. godine. Prvi od tih zakona navodi da je trenje između dva čvrsta tijela neovisno o kontaktnoj površini. Ako na primjer opeka klizi po ravnoj površini, tada će prema ovom zakonu trenje biti jednako bilo da klizi pa svojoj bazi, boku ili po svom kraju. Drugi zakon je da je trenje proporcionalno primijenjenom opterećenju jedne površine na drugu. Da nastavimo sa primjerom s ciglom, pa ako drugu ciglu stavimo na prvu ciglu trenje će se udvostručiti, sa trećom ciglom trenje će se utrostručiti, i tako dalje. Ovaj drugi zakon omogućuje definiranje koeficijenta trenja. Ako je trenje proporcionalno opterećenju tada, drugim riječima, trenje F je jednako konstanta pomnožena sa opterećenjem W .

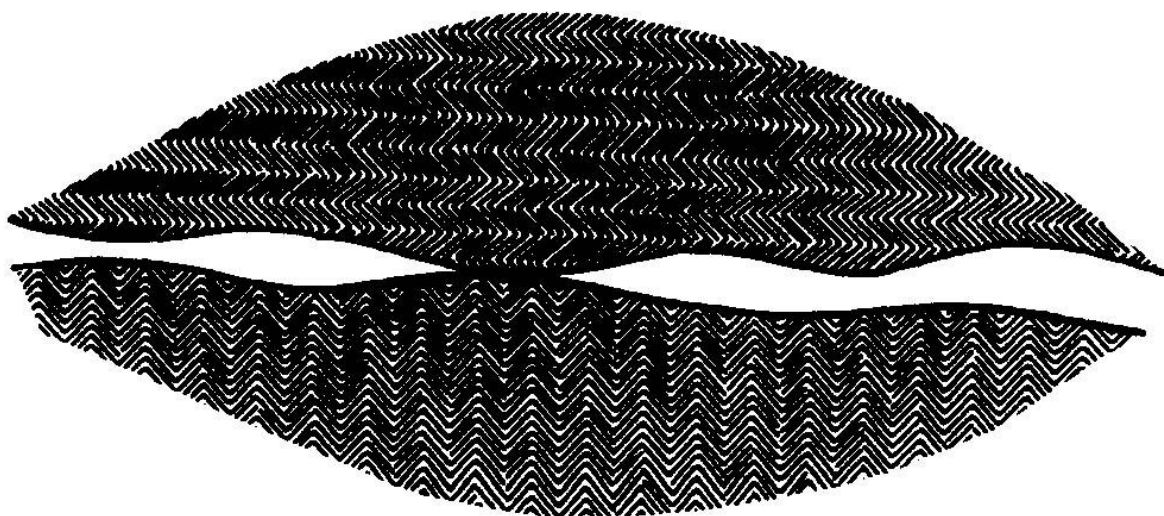
$$F = \text{konstanta} \times W$$

ili

$$\frac{F}{W} = \text{konstanta}$$

Ova konstanta je koeficijent trenja, obično se označava „ μ “. Koeficijent trenja ovisi uglavnom o materijalima koji međusobno klize, i može varirati od 0,003 do 3,0 i više. Koeficijent trenja između dva tijela zapravo nije sasvim konstantan. Često varira sa promjenama u opterećenju i

obično varira sa brzinom klizanja. Statičko trenje, predstavlja silu koja je potrebna da pokrene tijelo da kliže po drugom tijelu, gotovo uvijek je veće od dinamičkog trenja koje predstavlja silu koja održava gibanje jednolikom brzinom kad tijelo jednom počne klizati. Trenje između dvije suhe površine proizlazi iz dva glavna izvora, adhezije i deformacije, a puno važniji od ova dva je adhezija. Teško je zamislivo da se, na primjer, dvije glatke površine lijevanog željeza mogu zalijepiti zajedno jednako kao ljepljiva traka, ali zapravo svi se materijali lijepe zajedno do neke granice. To si možemo lakše zamisliti sjetimo li se da su čak i najglade tehničke površine hrapave kada ih gledamo preko jakog mikroskopa. Ta hrapavost znači da dvije krute površine koje se dodiruju su u kontaktu sa vrhovima svojih neravnina. To je prikazano uvećano Slikom 1.1.[1]



Slika 1.1 Kontakt između površina [1]

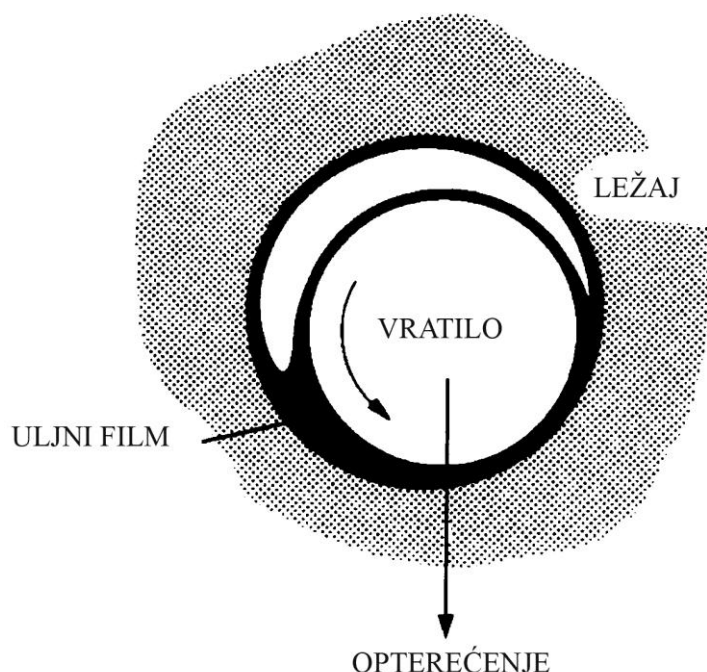
Neravnine su vrlo male, nešto poput milijuntog dijela kvadratnog milimetra površine. Ako se dvije površine opterećuju čak i sa opterećenjem od samo nekoliko mN, cijelo opterećenje preuzima mali broj tih vrhova neravnina, te pravi kontaktni tlak na vrhovima neravnina može biti visok i 1400 MN/m^2 . Tako ogroman tlak može stisnuti vrhove neravnina na kaljenom tvrdom čeliku ili izobličiti oblik površine lijevanog čelika i čak ih zavariti zajedno. Pod takvim tlakom lako je zamisliti neravnine slijepljene zajedno, čak i ako one nisu zapravo zavarene. Jednom kad su površine spojene, potrebno je upotrijebiti silu za razdvajanje, a potrebna bočna sila određuje kakvo je adhezijsko trenje. Druga glavna komponenta trenja je deformacijsko trenje. Obično je malog iznosa i očito je zašto to treba biti tako. Deformacija koja se pojavljuje kad se dvije površine taru može biti bilo elastična (privremena) ili plastična (trajna). Ako je deformacija elastična, tada će energija koja je proizvela deformaciju biti obnovljena kada se površine vrate u početni oblik. U tom slučaju neće biti gubitaka energije stoga niti trenja. Ako je deformacija plastična, oblik će se trajno promijeniti, jačina promjene, koja može biti tolerirana, u svim tehničkim komponentama je ograničena.

U stvari postoji jedan problem, kod tvari koje se elastično deformiraju dolazi do kašnjenja, ili histereze, prilikom vraćanja u početni oblik. Kada se to dogodi, energija korištena za

deformaciju će se obnoviti nakon prestanka kontakta, ali to može biti prekasno za vraćanje energije u sustav klizanja. Tada dolazi do gubitka energije i pojave trenja. Ovo je bitno za neke plastične materijale i pogotovo gume. Na primjer, „jako histerezne“ gume, za pneumatike su namjerno proizvedene da stvaraju jako histerezno trenje. To se radi zbog toga jer pneumatici gube većinu adhezijskog trenja kada su mokri, pa se na taj nadoknađuje adhezijsko trenje kako bi se osiguralo dobro prijanjanje na mokroj cesti. Zbog preciznosti treba napomenuti da kad dvije neravnine prijanjaju jedna uz drugu, one će se odvojiti pukotinama, ili kidanjem, u jednoj od površina. To rezultira prijenosom vrlo male količine materijala sa jedne površine na drugu, tako da je u stvari prisutna i deformacija. Glavni uzročnik je adhezija, te ako se ona smanji ili ukloni to će rezultirati smanjenjem ili uklanjanjem deformacije. Prvi zahtjev svih maziva je prema tome uklanjanje ili smanjenje sile nužne za stvaranje adhezijskog spajanja površina. To se može napraviti umetanjem materijala, koji se lakše smiče, između površina ili korištenjem kemikalija koje će promijeniti naprezanja između površina. Materijal umetnut između neravnina može biti plinovit, tekuć ili u krutom stanju, međutim kod plinova, tekućina ili polutekućina kao što je mast, pojavljuje se treća vrsta trenja. To je viskozno trenje, sila potrebna za smicanje viskozne tekućine.[1]

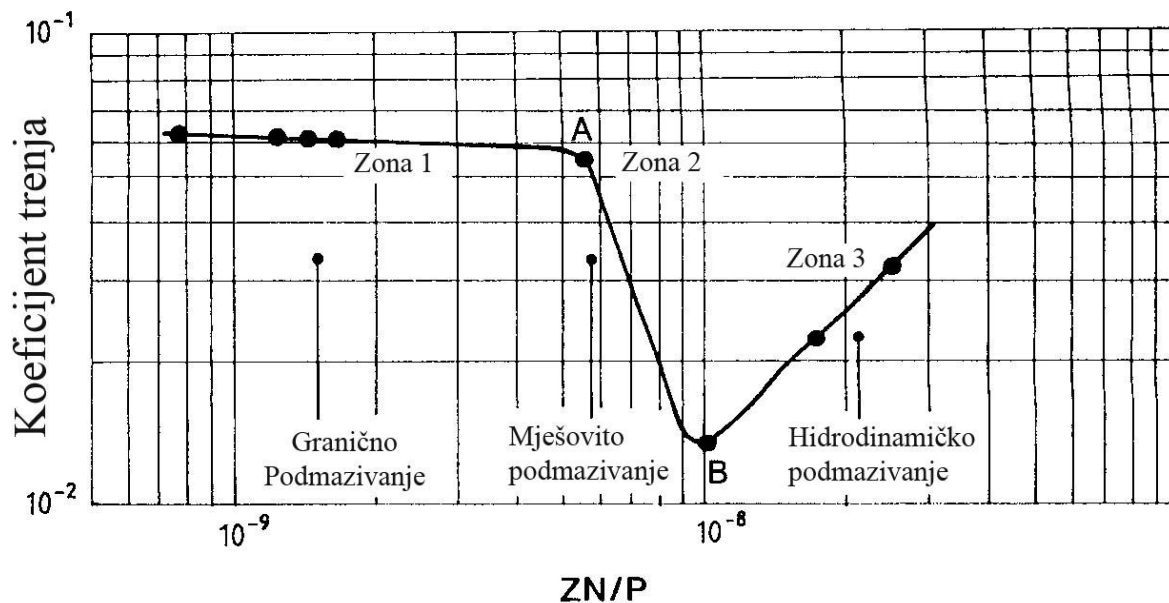
1.3 Podmazivanje kapljevinama

Podmazivanje kapljevinama se može jednostavno objasniti uzevši u obzir primjer rukavca ležaja kao što pokazuje Slika 1.2.



Slika 1.2. Podmazivanje rukavca kliznog ležaja [1]

Kako se vratilo okreće u ležaju, mazivo ulje se povlači u zonu opterećenja te se tlak i volumen ulja povećaju. Tlak raste a debljina uljnog filma će ovisiti o brzini vrtnje vratila te o viskoznosti maziva. Vezu između brzine, viskoznosti, opterećenja, debljine uljnog filma i trenja objašnjava dijagram 1.1.



Dijagram 1.1 Stribeckova krivulja [1]

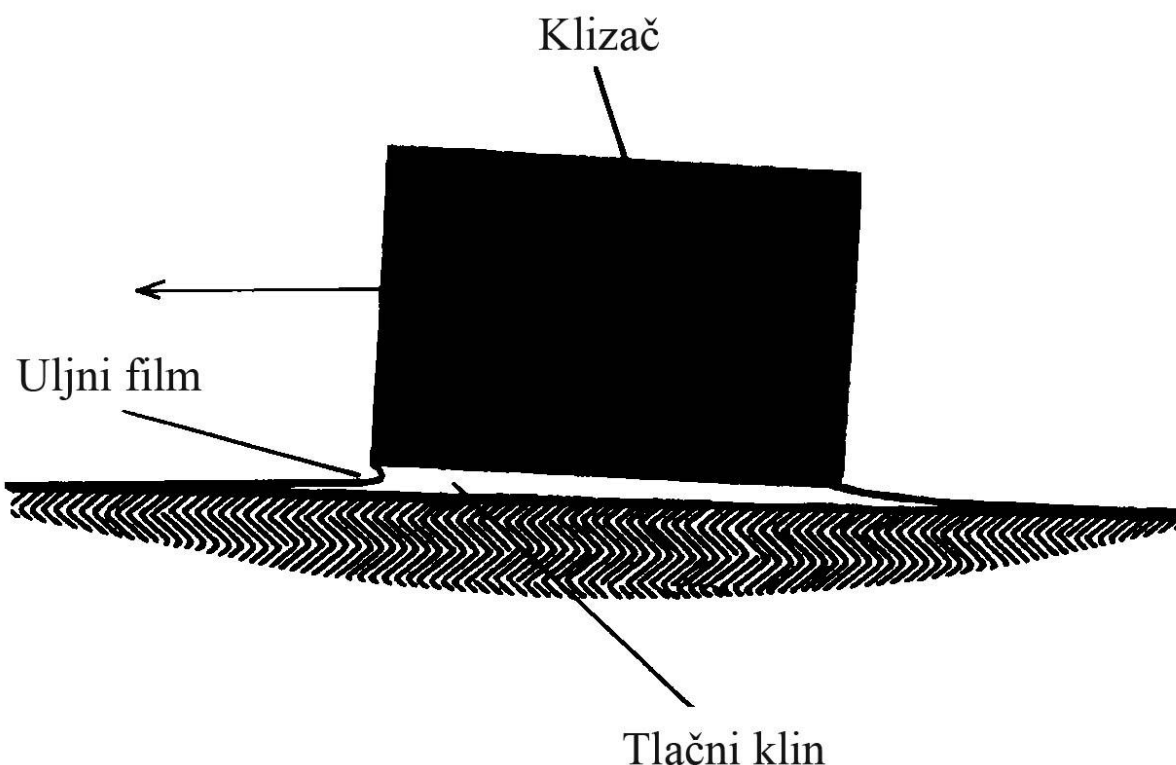
Ovaj dijagram pokazuje odnos koeficijenta trenja u ovisnosti o izrazu ZN/P gdje je:

$$\frac{ZN}{P} = \frac{\text{viskoznostulja} \times \text{brzinavratila}}{\text{pritisakležaja}}$$

U dijagramu su vidljive tri zone odvojene točkama A i B. U točki B koeficijent trenja je minimalan i to je točka kod koje je uljni film dovoljno debeo da se ne dodiruju neravnine površina vratila i ležaja. S glađim površinama točka B će biti pomaknuta više lijevo. U zoni 3, desno od točke B, debljina uljnog filma raste, zbog povećanja viskoznosti, povećanja brzine ili pada opterećenja i koeficijent trenja raste kako raste debljina uljnog filma. Zona 3 je zona „hidrodinamičkog“ podmazivanja. Sa promjenom uvjeta od točke B k točki A, debljina uljnog filma se smanjuje tako da neravnine na vratilu i ležaju stružu jedna o drugu. Struganje i trenje se povećavaju kako se uljni film smanjuje. U točki A debljina uljnog filma je smanjena gotovo na nulu, a opterećenje između vratila i ležaja u potpunosti preuzimaju neravnine u kontaktu. U zoni 1, lijevo od točke A, koeficijent trenja je ovisan o opterećenju, viskoznosti i brzini vratila. Zona 1 je zona „graničnog“ podmazivanja. Zona 2, između točke A i točke B, je poznata kao zona „mješovitog“ podmazivanja. U zoni 3 nema kontakta između površina te zbog toga nema ni trošenja materijala. U dijagramu 1.1 dvije su važne zone, a to su zona „rubnog“ trenja i zona „hidrodinamičkog“ trenja, jer pronalaskom najboljeg rješenja za ove zone to će biti također i najbolje rješenje za zonu 2. [1]

1.4 Hidrodinamičko podmazivanje

Hidrodinamičko podmazivanje jednostavno znači podmazivanje koje je postignuto gibanjem kapljevine. U slučaju rukavca ležaja koji je uzet za primjer, rotacija vratila omogućuje mazivu da dođe u zonu opterećenja. Kako se vratilo i ležaj približavaju u zoni opterećenja, ulaz u tu zonu se smanjuje u obliku zaobljenog klina. Budući da je ulje primoranogibati se u užu dio klina, tlak raste te „hidrodinamički“ tlak preuzima opterećenje na vratilu. Povećanjem opterećenja smanjuje se debljina filma dok se povećanjem „hidrodinamičkog“ tlaka povećava debljina uljnog filma.

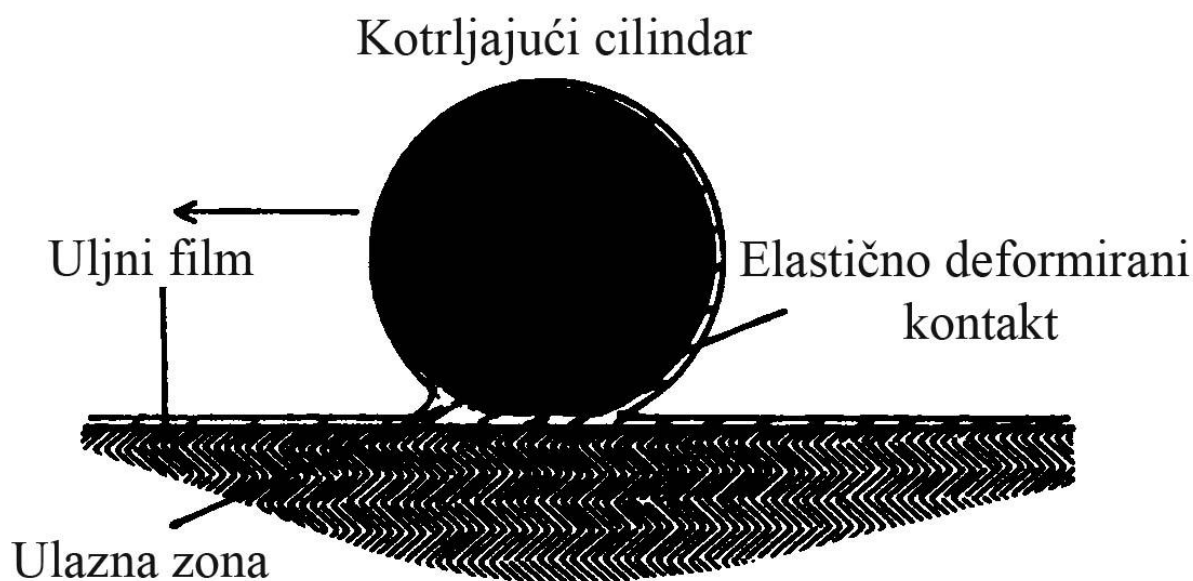


Slika 1.3 Tlačni klin kod klizog ležaja [1]

„Hidrodinamički“ tlak je određen viskoznošću ulja i brzinom kod koje je ulje stiješnjeno u zonu klinastog oblika. Slični tlačni klinovi su neophodni u gotovo svim sustavima koji se oslanjaju na hidrodinamičko podmazivanje. Većini korisnika dovoljno je znati da debljina uljnog filma ovisi o brzini, površina ležaja i viskoznosti ulja. Viskoznost je jedino svojstvo ulja koje je bitno kod hidrodinamičkog podmazivanja. Kod hidrodinamičkog podmazivanja veća brzina rezultira boljim podmazivanjem, a vrlo mala brzina može uzrokovati prestanak podmazivanja. Kod hidrodinamičkog podmazivanja je idealno da je uljni film debeo upravo onoliko da se neravnine dviju površina ne dodiruju. Drugim riječima, uljni film treba biti deblji od visina neravnina. U dijagramu 1.1 idealna točka je B.

Radi toga što se brzina i opterećenje ležaja te temperatura (stoga i viskoznosti) ulja nemogu održati potpuno konstantni, potrebno je ciljati točku malo desno od točke B. To će osigurati

da se trenje približi najmanjem mogućem trenju, ali će također osigurati minimalno trošenje. U praksi, površine novih ležaja su često grublje nego li je poželjno zbog čega je smanjena dodirna površina. Time će biti dopušteno trošenje materijala dok se grubost površina ne smanji. Svrha toga je napraviti sustav ležaja, koji nakon nekog vremena rada postigne veću debljinu uljnog filma od visina neravnina. Ovaj tradicionalni pristup je namijenjen za minimaliziranje ili uklanjanje trošenja nauštrb blagog porasta prosječnog trenja. U novije vrijeme porastom važnosti smanjenja potrošnje goriva, posebno u motorima vozila, sada je cilj postići što manje moguće trenje. Rezultat se postiže korištenjem mazivih ulja manje viskoznosti, proračunatih da osiguraju rad u, ili čak lijevo od, točke B u dijagramu 1.1, umjesto desno od točke B. Ovime se osigurava najniže moguće viskozno trenje, a efekti povećanja adhezijskog trenja i trošenja su minimalizirani odgovarajućim aditivima u ulju. Poseban tip hidrodinamičkog podmazivanja može naći svoju primjenu među određenim teško opterećenim kontaktima, kao što su kuglični ili valjkasti ležajevi te mnoge vrste zupčanika. Ako su geometrija i vrsta gibanja pogodni, mazivo može biti zarobljeno u ulaznom području nekog kontakta, i postati izloženo vrlo visokim tlakovima te stlačeno u ograničenom prostoru najopterećenijeg dijela kontakta. Ti tlakovi imaju dva važna efekta. Značajno povećavaju viskoznost maziva što povećava njihov kapacitet podnošenja opterećenja.



Slika 1.4 Elastodinamičko podmazivanje cilindra na ravnoj površini [1]

U isto vrijeme omogućuju elastičnu deformaciju opterećenih površina na taj način da se poveća površina na koju djeluje opterećenje. Otkad se kapacitet podnošenja opterećenja kontrolira elastičnim i hidrodinamičnim efektima, pojava je poznata kao elastohidrodinamičko podmazivanje. Slika 1.5 ilustrira djelovanje elastohidrodinamičkog podmazivanja. Izvedeno je nekoliko različitih jednadžbi kojima se računa debljina filma maziva kod elastohidrodinamičkog podmazivanja. Za većinu korisnika dovoljno je znati da je važno svojstvo maziva njegova viskoznost. Premda se, tehnički, hidrodinamičko podmazivanje odnosi na kapljevita maziva, može se primijeniti kod podmazivanja plinom,

pod uvjetom da su opterećenje i brzina pogodni za vrlo nisku viskoznost plinova. Međutim, elastohidrodinamičko podmazivanje se nemože ostvariti plinovima.[1-3]

1.5 Granično podmazivanje

Kad god debljina filma maziva postane premala da potpuno odvoji površine, površinske neravnine se počnu dodirivati, te viskoznost više nije jedino bitno svojstvo. U zoni 1 u dijagramu 1.1 uljni film je toliko tanak da nema hidrodinamičkog dijela podmazivanja nego je prisutno isključivo granično podmazivanje. U normalnim okolnostima neravnine su u početku prekrivene slojem oksida, kao što je željezni oksid na željezu ili čeliku, aluminijski oksid na aluminiju itd. Kad se takve površine trljaju, njihova sklonost prijanjanju je relativno slaba. Međutim, ako se oksidni sloj ukloni nakon nekoliko trljanja tada izložene metalne površine imaju vrlo jaku sklonost prijanjanja. Prema tome, ako površine ležaja zadrže oksidne slojeve trenje i trošenje će biti ublaženo. Ako površine izgube svoje oksidne slojeve pojavit će se veliko trenje i veliko trošenje. U oba slučaja cilj graničnog podmazivanja je smanjenje trenja i trošenja.[1]

1.6 Tlačno podmazivanje

Već smo prije objasnili da je visoki tlak potreban kako bi se dobio tekući film za odvajanje površina ležaja uz pomoć njihovog međusobnog gibanja. Isti efekt može biti dobiven ubacivanjem maziva pod vrlo visokim tlakom u ležaj, to će omogućiti potpuno odvajanje neravnina i ondje gdje viskoznost ili brzina nisu dovoljni za održavanje hidrodinamičkog podmazivanja. Osnovna teorija tlačnog (ili hidrostatskog) podmazivanja je vrlo jednostavna. Potreban prosječni tlak je jednak opterećenju W podijeljenim sa efektivnom površinom ležaja A :

$$p = \frac{W}{A}$$

U praksi, konstrukcija hidrostatskog ležaja se proračunava tako da se održava stabilnost te da se može regulirati protok maziva. Za tlačno podmazivanje se koriste tekuća maziva ili čak i masti, no također često se koriste i plinovi jer možemo zanemariti probleme vezane uz vrlo nisku viskoznost plinova.[1]

1.7 Suho ili kruto podmazivanje

Kruto mazivo je u osnovi bilo koji kruti materijal koji se može staviti između dvije površine ležaja te će se smicati puno lakše pod datom opterećenju nego li sam materijal ležaja. Koeficijent trenja kod suhog podmazivanja je povezan sa smičnom silom i opterećenjem ležaja:

$$\mu = \frac{\text{smičnasila}}{\text{opterećenje}}$$

U praksi, nedvojbeno su i ostala svojstva bitna za dobro kruto mazivo, kao što su kemijska stabilnost, mogućnosti prijanjanja na površinu ležaja itd. Ova je tema detaljno opisana u nastavku.[1]

1.8 Trošenje

U praksi najčešći oblik trošenja je adhezijsko ili abrazijsko trošenje. Jačina adhezijskog trošenja ovisi o jačini adhezijskih sila, a konačna oštećenja mogu biti od otkidanja nekoliko molekula do otkidanja cijelog dijela ili taljenja površina. Mazivo koje smanjuje adhezijske sile između površina će očito smanjiti adhezijsko trošenje. Abrazijsko trošenje ili abrazija, je trošenje uzrokovano zajedanjem grubih površina ili prodiranjem tvrdog materijala u mekši. Uzrok abrazije mogu biti i čestice između dvije površine. Prema tome, mazivo može spriječiti adheziju na dva načina. Prvi je da spriječi abrazivne čestice da dođu u zonu kontakta površina ili ih čak izbaci iz zone kontakta. Drugi način je da je debljina maziva dovoljno debela da abrazivne čestice prolaze kroz opterećenu zonu bez da dodiruju površine.[1]

1.9 Hlađenje

Mazivo postiže efekt hlađenja na dva načina. Smanjenje trenja će smanjiti generiranje topline u ležajevima, u takvim slučajevima, kapljevina krutina ili plin koji smanjuje trenje će se ponašati kao rashladno sredstvo. Međutim, mnogo češće rashladni efekt se postiže odvođenjem viška topline iz sustava u odvojeni rashladni sustav. Za ovu svrhu bitni faktori su visoka specifična toplota maziva i velik protok. Kapljevine su bolje kao rashladno sredstvo zbog veće specifične topline. Masti i krutine su poprilično neefektivni zbog nedostatka protoka.[1]

1.10 Sprječavanje korozije

Mineralna ulja su vrlo djelotvorna u sprječavanju korozije, pa se to također očekuje od svih maziva. A u stvari, većina kapljevutih maziva i masti će pružiti zaštitu do neke mjere, a sintetička maziva i biljna ulja će biti puno manje djelotvornija s obzirom na mineralna ulja. Maziva koja sadrže vodu, kao što su vatro-otporne emulzije mogu biti uzročnici korozije, a kruta maziva mogu varirati od blago zaštitni do blago korozivni. Maziva koja su početno nekorozivna ili čak zaštitna, u radu mogu postati onečišćena vodom ili kiselinama pa će postati korozivna. Korozivno trošenje je pojava korozije i trošenja u isto vrijeme, a gubitak materijala može biti puno veći nego kod posebne pojave korozije ili trošenja. Razlog toga je jer korodirana površina je puno manje otporna na trošenje nego nekorodirana površina i istrošena površina puno lakše korodira nego neistrošena površina. Korozijsko trošenje je lakše ukloniti sprječavanjem pojave korozije nego sprječavanje pojave trošenja.[1]

2. ODABIR TIPA MAZIVA

2.1 Podmazivati ili ne

U knjizi o odabiru maziva [1] može se činiti neobičnom rasprava o opciji ne korištenja maziva, ali svakako bi bilo pogrešno zaključiti da svaki mehanizam s pomičnim dijelovima neizostavno zahtjeva podmazivanje. Postoji nekoliko mogućih razloga za ne korištenje maziva, i nekoliko sredstava pomoću kojih se to može postići. Među mogućim razlozima za ne podmazivanje su i sljedeći:

- a) izbjegavanje troškova samih maziva i svih troškova kupovanja istih te skladištenja, i briga da je mazivo uvijek prisutno u strojevima u zadovoljavajućem stanju,
- b) pojednostavljenje sustava, (eliminiranje potrebe za dijelovima kao što su pumpe, brtve, filter kape, rupe za podmazivanje i odvodnju),
- c) izbjegavanje zagađivanja proizvoda, ili radnog okruženja i povećanog rizika od požara, često povezanih s mazivima,
- d) izbjegavanje nakupljanja abrazivnih nečistoća na izloženim dijelovima.

Vjerojatno najjednostavnija metoda za izbjegavanje korištenja maziva je proizvodnja dijelova od materijala koji bi se lako pokretali i sa prihvatljivom razinom trenja dok stružu jedan uz drugi bez dodavanja maziva.

Nekoliko takvih materijala je opisano u poglavlju 3. Njihovi glavni nedostaci su veća jedinična cijena i manja čvrstoća, ali postoji na tisuće primjena, posebno u automobilske industriji.

Gdje je relativno gibanje između dviju komponenti ograničeno amplitudom, kao u izmjeničnom, vibrirajućem i oscilirajućem kretanju, često je moguće upotrebljavati elastične materijale za prilagođavanje kretanja i izbjegavanje bilo kojih relativnih klizanja. Jednostavan primjer je upotreba gumenih blokova na mjestu spojke da se prilagodi odstupanje u rotirajućem vratilu. Sličan sustav kakav je masovno bio korišten godinama u motornim vozilima sastojao se od diska od laminiranog, gumiranog materijala da bi se prilagodilo odstupanje između diferencijala i pogonskog vratila.

Kao ograničenje u takvoj primjeni često će se nametnuti povišenje temperature između elastičnih dijelova kod većih brzina, opterećenja i amplituda.

Magnetski ovjesi su bili poznati mnogo godina kao sredstva izbjegavanja kliznih kontakata između dijelova. Magnetski ležajevi su sada dostupni na tržištu da bi podnosili znatna opterećenja i brzine s velikom pouzdanošću. Prednost im je eliminacija trenja i trošenja. Nedostaci su im viša početna cijena od sličnih podmazanih ležajeva, problemi sa napajanjem i upravljačkom sistemom te vitalni značaj u osiguravanju kontinuiranog napajanja.

Konačan primjer tehnike kojom se izbjegava dodatno podmazivanje je upotreba fluida (plin) koji je prisutan i za neke druge svrhe. Osim ako se viskozitet fluida ne poklapa sa uvjetima za hidrodinamičko podmazivanje, vanjsko ubrizgavanje moglo bi biti neophodno, i ta dodatna komplikacija mora biti uravnotežena prema uočenim prednostima izbjegavanja dodavanja maziva. Međutim, u nekim slučajevima i nisko-viskozni fluidi mogu biti korisni kod reduciranja trenja i trošenja do prihvatljive razine i kod hlađenja trljajućih površina.

Ukratko, postoje mnoge alternative dodavanju maziva. Sve imaju prednosti i nedostatke koje mogu biti pametno iskorištene u planiranju novih sustava. Međutim, ispravno je reći da će u velikoj većini slučajeva, upotreba konvencionalno podmazanih ležajeva osigurati svoje mjesto kao najjednostavnija i najjeftinija opcija. [1-3]

2.2 Problem kod izbora maziva

Kada bi bilo dostupno samo nekoliko vrsta maziva, teško bi došlo do problema odabira. Koristila bi se dostupna ulja, masti i kruta maziva, sa svojim prednostima i nedostacima i svim što im je dano. To je bila generalno situacija do sredine 19.stoljeća, i ljudi su koristili tvari kao što je ovčja mast, guščja mast, sirovu naftu, prirodni grafit ili čak molibdenit (sirovi prirodni molibdenovdisulfid), kad god se pojavila prilika da je lokalno dostupan.

Danas, izbor maziva je ogroman. Većina proizvođača maziva može ponuditi različita mineralna ulja, mnogo različitih masti i nekoliko različitih sintetičkih ulja, a postoji stotinu proizvođača, kao i specijaliziranih dobavljača i suhih maziva [1], [4].

Ta velika različitost znači da se svaki od jednostavnijih strojeva može zadovoljavajuće podmazati nekim od stotinu različitih maziva. Na primjer, šarka na vratima i kvaka (brava, zasun) mogu raditi ispravno uz mnoštvo mineralnih ulja, sintetičkih ulja, masti i suhih maziva (ili čak, za kratko vrijeme, bez ijednog od toga). Čak i mnogo kompliciraniji strojevi mogu biti kritični u svojoj potrebi za mazivima. Može biti zbog toga što su vrlo često u potpunosti dizajnirani i sagrađeni prije bilo kakve pomisli na njihovo podmazivanje.

Izbor je često podsvjestan, prati prethodnu primjenu ili ono što se čini normalnom primjenom za pojedini tip stroja ili dijela. Na primjer, bilo bi skoro automatski upotrijebiti ulje u reduktoru ili mast u izoliranim kugličnim ležajevima. U većini slučajeva nema problema i stroj radi zadovoljavajuće s naknadno izabranim mazivom. Međutim, bilo je slučajeva kad nijedno od stotine maziva nije bilo zadovoljavajuće. Kada se to dogodi, može se pojaviti hitna i dragocjena potreba da se proizvede zadovoljavajuće mazivo ili prilagodi stroj. Nisu nepoznati slučajevi da je velik ili skupi stroj morao biti otpisan jer nije mogao biti zadovoljavajuće podmazan. Češće se može naći primjer da, dok je podmazivanje različitih dijelova prihvatljivo, postoje problemi koji se odnose na odabir maziva, kao što su velika potrošnja maziva, propuštanje, kratki vijek maziva ili prekomjerna potrošnja goriva.

Problem maziva trebalo bi uzeti u obzir ranije prilikom konstruiranja strojeva, ali činjenica je da strojevi dolaze do svojih vlasnika s još uvijek neriješenim pitanjem podmazivanja. Drugi

faktori mogu dovesti do preispitivanja potrebe strojeva za podmazivanjem. Nova i bolja maziva često postaju dostupna ili je originalno mazivo nedostupno. Stroj može biti izmijenjen ili upotrijebljen u druge svrhe ili premješten u drugu okolinu. Izbor maziva je zato važna tema za korisnike strojeva, kao i za njihove proizvođače, naravno.

Unatoč tome što je rečeno u posljednjim odlomcima, postoje dobri tehnički i trgovački razlozi za korištenje maziva u novim strojevima koje je odabrao proizvođač. Obično se treba preispitati odabir maziva samo kad se pojavi problem ili kad se podrazumijeva promjena u radu nekog stroja. U odabiru maziva za određenu primjenu, predmet bi trebao dobiti najnižu ukupnu dugoročnu cijenu, ali to definitivno ne znači uporabu najjeftinijeg dostupnog maziva. Nije dobro koristiti jeftino ulje pa se, kao rezultat toga, ulje ili stroj unište ili osoblje za održavanje troši previše vremena na provjeravanje ili zamjenu ulja. Drugim riječima, pouzdanost se čini puno važnija od početne cijene maziva. [1]

2.3 Osnovni tipovi maziva

Maziva su obično podijeljena u 4 osnovna tipa:

- a) Ulja. Termin koji se upotrebljava za sva tekuća maziva, bilo da su to mineralna ulja, prirodna ulja, sintetička, emulzije ili čak procesni fluidi.
- b) Masti. To su ulja koja sadrže sredstvo za zgušnjavanje koje ih čini polu-krutim, no ponekad je zgodno uključiti i polu-tekuće masti pod u istu skupinu.
- c) Čvrsta (suha, kruta) maziva. Uključuje bilo koje mazivo koje se koristi u krutom stanju i mogu biti rasute krute tvari, premazi nalik boji ili sitni prah.
- d) Plinovi. Plin obično korišten u plinskim ležajevima je zrak, ali može biti korišten i bilo koji drugi plin i on neće oštetiti ležaj ili se sam razgraditi.

Pregled svojstava ovih četiri tipa maziva su sažeti u Tablici 2.1.

Tablica 2.1 Svojstva osnovnih tipova maziva[1-3], [5]

Svojstvo maziva	Ulje	Masti	Suho mazivo	Plin
1. Hidrodinamičko podmazivanje	Odlično	Prolazno	Nikakvo	Dobro
2. Granično podmazivanje	Slabo do odlično	Dobro do odlično	Dobro do odlično	Slabo
3. Hlađenje	Vrlo dobro	Slabo	Nikakvo	Prolazno
4. Nisko trenje	Dobro	Prolazno	Slabo	Odlično
5. Jednostavnost snabdijevanja	Dobro	Prolazno	Slabo	Dobro
6. Sposobnost zadržavanja u ležaju	Slabo	Dobro	Vrlo dobro	Vrlo slabo
7. Sposobnost brtvljenja	Slabo	Vrlo dobro	Dobro	Vrlo slabo

8. Zaštita od korozije	Odlično	Dobro do odlično	Slabo prolazno do	Slabo dobro do
9. Temperaturni raspon	Odlično	Dobro	Dobro do odlično	Odlično
10. Isparljivost	Vrlo visoko do nisko	Nisko	Nisko	Vrlo visoko
11. Zapaljivost	Vrlo visoko do vrlo nisko	Nisko	Nisko	Neograničeno varira
12. Kompatibilnost	Vrlo loše do dobro	Prolazno do dobro	Odlično	Dobro
13. Cijena maziva	Niska do vrlo visoko	Visoko do vrlo visoko	Visoko	Vrlo niska
14. Složenost konstrukcije ležaja	Niska	Nisko	Nisko do visoko	Vrlo visoko
15. Životni vijek određuje...	Onečišćenje	Kvarenje	Trošenje	Održavanje snabdijevanja

Prednosti i nedostaci ulja proizlaze iz njihove sposobnosti tečenja. Vrlo ih je jednostavno prelići iz spremnika u ležaj, kapanjem raspršivanjem ili upumpavanjem te ih izbaciti iz stroja kad više nisu prikladni za upotrebu. Najvažnije od svega, s odgovarajućom konstrukcijom ležaj može sam puniti uljem opterećene zone. Druge prednosti su hlađenje ležaja odvođenjem topline te uklanjanje krhotina. S negativne strane, ulje može lako pobjeći iz ležaja, iscuriti iz spremnika ili stroja, prijeći na okolne površine i čak ispariti ako je ležaj vruć i dobro prozračan. Nadalje, zbog toga jer je tekuć ne brtvi protiv nečistoća ili prodora vlage u ležajeve.

Masti se ponašaju kao i ulja u mnogo slučajeva, a koriste se tamo gdje nedostaci lakog tečenja prevladaju prednosti. Masti neće lako iscuriti iz strojeva ili spremnika ali će efektivno brtviti protiv nečistoća. S druge strane masti je puno teže dovesti u ležaj i gotovo su potpuno nekorisne za hlađenje. Prednosti i nedostaci krutih maziva su slični ekstremima masti, gdje maziva uopće ne teku. Prednosti i nedostaci plinovitih maziva slični su ekstremima ulja, gdje su značajke tečenja gotovo predobre. Kruta i plinovita maziva imaju posebne prednosti i nedostatke, te su općenito korištena samo u posebnim situacijama.[1]

2.4 Odabir tipa maziva

Postoji nekoliko načina pristupanja problemu odabira tipa maziva za određeni sustav. Zasigurno, uobičajen način je odabir onog tipa maziva koji se smatra normalnim za uređaj ili kombinaciju uređaja koji će ga koristiti. Nema sumnje da će ovakav pristup biti uspješan u većini slučajeva. Može zakazati ako su bilo koji od uvjeta, brzina, opterećenje, temperatura itd. bitno drugačiji od onih normalnih za dotični sustav, ali čak i kad se uspije to nemora značiti da je to najbolje rješenje za odabrani problem. Kako bi se uvjerali da je odabrani tip najbolji za primjenu uvijek je poželjno razmotriti alternative. Jedan alternativni pristup je definirati uvjete rada koji se očekuju primjenom stroja ili komponenata i dovesti ih u vezu sa

moгуćnostima razliĉitih tipova maziva. Ako je to dobro obavljeno, ovaj pristup mora uspjeti u odabiru tipa maziva koji je tehniĉki pogodan, ali to ne znaĉi da je najprikladniji ili da će biti dugoroĉno najjeftiniji. Treći pristup je razmatrati jednostavnost razliĉitih alternativa. Sustav podmazivanja nikad ne smije biti izveden kompleksnije nego li je potrebno da bi ispravno radio. Najjednostavnije tehnike ĉesto su najpouzdanije i najjeftinije. Najjednostavniji oblik podmazivanja sadrži malu koliĉinu ĉistog mineralnog ulja ili masti na mjestu u ležaju bez sistema opskrbe. Time će se zadovoljiti beskrajan opseg sustava podmazivanja, od brave na vratima do šivaćih strojeva i bicikala. Podbaciti će kad brzina, opterećenje ili temperatura postanu preveliki, očekivana životna dob stroja je predugaĉka ili kad ulje postane oneĉišćeno strugotinama ili ostalim oneĉišćivaĉima. Kad se ovakva situacija pojavi poĉinje problem oko odabira maziva. Tada će možd biti potrebno koristiti drugaĉije ulje, mast, suho mazivo, plinovito mazivo ili sistem opskrbe mazivom. [1]

2.5 Odabir maziva za određenu vrstu komponenata

Sljedeća podjela pokazuje kako su razliĉiti zahtjevi razmatrani u odnosu na svojstva maziva i uobiĉajenu primjenu za nekoliko vrsta komponenti. Kratak pregled razliĉitih komponenti koje trebaju razliĉita svojstva maziva dat je tablicom 2.2

Tablica 2.2 Zahtjevi razliĉitih komponenata[1]

<i>Svojstvo maziva</i>	Obiĉni rukavac	Kugliĉni ležaj	Zatvoreni zupĉanici	Otvoreni zupĉanici	Satovi i instrumenti
1. Graniĉno podmazivanje	*	*	***	***	**
2. Hlađenje	**	**	***		
3. Nisko trenje	*	*	**	**	**
4. Sposobnost zadržavanja u ležaju	*	**		***	***
5. Sposobnost brtvljenja		**		**	
6. Temperaturni raspon	**	**	**	*	
7. Zaštita od korozije	**	**	*	***	
*** najveći znaĉaj, ** manji znaĉaj, * mali znaĉaj					

2.5.1. Klizni ležaj

Idealni klizni ležajevi su podmazivani kapljevitim mazivom, gdje je debljina uljnog filma dovoljno debela da potpuno odvoji klizne površine ležaja, tako da je trenje vrlo malo te ne dolazi do trošenja. Kod velikih brzina preferira se ulje, jer omogućuje nisko trenje te može odvesti toplinu koja nastaje trenjem. Kod nižih brzina prihvatljivija je mast, jer ne postoji opasnost od pregrijavanja i mast je lakše zadržati u ležaju. Ako postoji opasnost od onečišćenja prašinom ili zemljom, mast je bolja u sprječavanju onečišćenja. Kod velikih brzina gdje se mora koristiti ulje, potrebno je filtrirati ulje zbog uklanjanja nečistoća i koristiti cirkulacijski sustav. Kod ekstremno velikih brzina u malim ležajevima, preferiraju se plinovita maziva, ali konstrukcija zahtjeva vrlo preciznu obradu i opterećenje je ograničeno. Ako je temperatura previsoka ili preniska za ulje ili mast, kruto mazivo može biti najbolje rješenje, no kod njih uvijek postoji trošenje pa prema tome njihov je životni vijek ograničen i trenje je veće nego kod ulja i masti. Kruta maziva se često preferiraju kod visokih opterećenja i vrlo niskih brzina kao kod ležajevima na mostovima.[1]

2.5.2 Kuglični ležaj

Kuglični ležajevi su daleko češće podmazivani mastima nego uljima. To je zbog toga jer mast ima prednost pružanja vrlo efektivnog brtvljenja kućišta ležaja. Time je spriječen gubitak maziva ili ulazak zagađivača, dok je u isto vrijeme zadržana potrebna količina maziva između gibajućih površina. Plinovita maziva se ne mogu koristiti za podmazivanje kugličnih ležajeva, ali kruta maziva mogu.[1]

2.5.3 Zatvoreni zupčanci

Zatvoreni zupčanci obično se podmazuju uljem. Za većinu primjena obična mineralna ulja su zadovoljavajuća, ali kod većih brzina potrebno je koristiti aditive za smanjenje viskoznosti i antioksidacijske aditive. Pužni prijenosi i teško opterećeni stožasti zupčanci trebaju EP (extreme pressure) aditive. Kod niskih brzina obično se koriste masti, posebno kod malih zupčanika. Kao kod kugličnih ležaja, plinska maziva se nemogu koristiti kod zupčanika, no mogu se koristiti kruta maziva. Zatvoreni zupčanci uvijek sadrže ležajevu, pa isto mazivo mora zadovoljavati potrebe i ležaja i zupčanika.[1]

2.5.4 Parne turbine

Parne turbine se podmazuju uljem, i imaju vrlo stroge zahtjeve na svojstva ulja. Temperature su visoke, brzine su visoke i prisutna je vlaga (para,voda). Pouzdanost je osobito važna jer parne turbine mogu biti vrlo velike i često su glavna značajka kompleksnog postrojenja od

kojih se očekuje da su u pogonu za dugo vrijeme, često godinama bez remonta ili promjene ulja. Zbog visokih temperatura i brzina postoji velika opasnost od oksidacije pa se koriste visoko rafinirana ulja sa antioksidacijskim aditivima. Kondenzacija pare dovodi do onečišćenja vodom, a visoke temperature i brzine imaju sklonost formiranja emulzije. Centrifugalni odvajači se koriste za odvajanje vode, ali ulje mora biti formulirano za lako odvajanje i mora ostati čisto nakon filtracije. Čim je prisutna voda postoji opasnost od hrđanja, pa se dodaju dodaci protiv korozije kako bi se zaštitile metalne površine sustava. Velike brzine također mogu uzrokovati pjenu koja može biti štetna na dva načina. Prvi, ako pjena uđe u ležaj mazivo će postati manje efektivno što može uzrokovati oštećenja. Drugi, zbog toga jer pjena zauzima veći volumen nego ulje, prekomjerno pjenjenje dovodi do gubitka ulja u sustavu. Stoga su ulja za parne turbine formulirana tako da smanje pjenjenje.[1]

2.5.5 Otvoreni prijenosi, konopci i lanci

Obično se koriste ulja pa je važno osigurati da ulje ne bude izbačeno uslijed velikih brzina ili naglih ubrzanja. Ulja koja se koriste su viskozna i ljepljiva, a to su bitumenska ulja ili ulja koja postaju ljepljiva zbog korištenja aditiva. Masti često nude zadovoljavajuće podmazivanje, ali postaju preskupe za primjenu u velikim razmjerima. [1]

2.5.6 Satovi i osovine instrumenata

Tradicionalno se satovi i osovine instrumenata podmazuju malim količinama ulja u ležajevima. Prvotno se podmazivalo biljnim uljem koje je tijekom 19. stoljeća zamijenilo mineralno ulje. Sad se preferiraju sintetička ulja formulirana da pružaju malu viskoznost. Opterećenje i brzine su niske pa su pogodne sve vrste maziva. Međutim, za ovu primjenu je potrebno vrlo nisko trenje pa je ulje s malom viskoznošću najprikladnije. Za neke instrumente u kojima je trenje iznimno važno, kao što su žiroskopi u inercijskim orijentacijskim sustavima, sad se koriste plinski ležajevi.[1]

3. KRUTA MAZIVA

Kruto podmazivanje je jednostavno podmazivanje između dviju površina u interakciji, s krutim materijalom umetnutim između te dvije površine. Ovisno o prirodi materijala od kojeg su izrađene površine, velika raznovrsnost krutih materijala može smanjiti trenje i spriječiti oštećenja. Na primjer, prašina, pijesak ili šljunak na površini ceste mogu uzrokovati proklizavanje jer smanjuju trenje između guma automobila i ceste. Tehnički govoreći, oni se ponašaju kao maziva, no naravno nitko ne bi preporučio prašinu, pijesak ili šljunak kao kruta maziva. Stotine različitih krutih materijala je testirano za upotrebu kao kruta maziva i velika većina njih je upotrebljiva u praktičnoj upotrebi. Oni uključuju materijale kao što su liskun, tinjac i kreda. Međutim, sposobnost smanjenja trenja je jedna od važnih karakteristika krutih maziva i većina materijala ima ozbiljne nedostatke koji ih isključuju iz liste efektivnih maziva. Kao posljedica toga, većina krutih maziva je načinjena samo od tri polazišna materijala: grafita, molibden disulfida i politetrafluoroetilen (PTFE).

Karakteristike koje su poželjne za dobro kruto mazivo su:

- malo, ali konstantno i kontrolirano trenje,
- kemijska stabilnost u određenom temperaturnom rasponu,
- bez sklonosti oštećivanja materijala ležaja,
- strogo prijanjanje za jednu ili obje površine ležaja tako da se mazivo brzo ne odstranjuje iz ležaja,
- dovoljna otpornost na trošenje da bi se omogućio dovoljan vijek trajanja,
- jednostavna primjena u kontroliranim uvjetima,
- netoksičnost,
- ekonomičnost.

Tablica 3.1 Neki materijali koji se koriste kako kruta maziva[1]

<i>Slojevito-rešetkasti spojevi</i>	
Molibden disulfid	Grafit
Volfram diselenid	Volfram disulfid
Kalcij fluorid	Grafit fluorid
<i>Polimeri</i>	
PTFE	Najlon
PTFCE	Acetl
PVF	Poliamidi
FEP	
PEEK	
<i>Metali</i>	
Olovo	Kositar
Zlato	Srebro
Indij	
<i>Ostali anorgani</i>	
Olovni monoksid	Baronnitrid
Olovo monoksid	Barontrioksid

Ovi uvjeti su vrlo zahtjevni, i većina maziva koja ih uspješno zadovoljava su ili polimeri, neorganski praškovi ili metali. Neki od njih su navedeni u Tablici 3.1. Mnogi od njih su uključeni u kompozite. To su miješani materijali u kojima se, na primjer, neka mekana komponenta može ojačati da smjesa postane tvrđa, ili se podmazivajući prah može raspršiti u čvrstu komponentu da se smanji trenje, ili se pomoću vezivog sredstva mogu spojiti čestice maziva u prahu. Raznovidnost krutih kompozita za podmazivanje je beskonačna, no samo je nekoliko tipova iskorišteno u masovnoj primjeni. Grafit i PTFE, i mnogo drugih maziva i kompozita se mogu koristiti u konstruiranju ležaja i ležajnih komponenata. Oni su poznati kao suhi ležajevi, no izraz nije potpuno točan. U određenim okolnostima, konvencionalni tipovi ležaja se mogu koristiti bez maziva, na primjer ležajevi s malim opterećenjem, malim brzinama ili ležajevi koji rade na vrlo niskim temperaturama, i oni bi jednako tako bili suhi ležajevi. Prema tome bolji izraz bi bio ležajevi sa samopodmazivanjem. Tri važna maziva, i mnogi ostali, imaju slojevitou strukturu, kao što je prikazano slikom 3.1.



Slika 3.1 Slojevita struktura mnogih krutih maziva [1]

Grafit, molibden disulfid, kalcij fluorid i ostali imaju slojeve složene od ravnih listova atoma i molekula, i struktura se naziva višeslojna struktura. Kod PTFE i nekih drugih polimera slojevi se sastoje od dugačkih paralelnih ravnih lanaca molekula. U svim slučajevima se pojavljuje vrlo važan efekt, a to je da se materijali mogu lakše pomicati kad su paralelni sa slojevima nego kad su okomiti na njih. Kao rezultat toga mogu podnijeti relativno velika opterećenja pod pravim kutovima na slojeve dok u isto vrijeme mogu vrlo lako klizati paralelno na slojeve. Koeficijent trenja je jednak smičnom naprezanju paralelnom na slojeve podijeljenom sa tvrdoćom okomitom na slojeve. Kod PTFE, molibden disulfida i nekih sličnih materijala, smično naprezanje paralelno na slojeve je relativno malo, drugim riječima, smično naprezanje je odlika materijala. Kod nekih drugih slojevitih materijala, prije svega grafita, smično naprezanje paralelno na slojeve nije malo kad je materijal čist, ali se smanjuje kad su prisutni zagađivači kao što je vodena para. S obzirom na malo trenje samo paralelno na slojeve, slijedi zaključak da će ova kruta maziva biti efektivna samo kad su im slojevi paralelni sa smjerom klizanja. Također je važno da se kruto mazivo čvrsto drži za ležajnu površinu, u suprotnom bi se lako odvojio i to bi značio i kratak vijek trajanja. Najbolja kruta maziva se čvrsto drže za metalne površine i čak za mnoge nemetalne površine. No neke višeslojne komponente se neće držati i zbog toga imaju ograničenu vrijednost podmazivanja. Korisna karakteristika za

određivanje kapaciteta podmazivanja krutog maziva je PV faktor. To je podatak o najvećem pritisku i brzini kod kojih se mazivo može uspješno koristiti. Obično se postavlja kao: $\text{kN/m}^2 \times \text{m/s}$ ili kN/ms . PV faktor je zapravo prejednostavan jer sakriva činjenicu da PV kod jednog materijala može biti ograničen zbog lošeg odziva na opterećenje, a kod drugog materijala može biti zbog lošeg odziva na brzinu. Drugim riječima, dva materijala mogu imati isti PV, no jedan od njih se može koristiti na većim opterećenjima od drugog, dok se drugi može koristiti na većim brzinama od prvog. Za određene slučajeve se ponekad treba točno odrediti opterećenje i brzina neovisno jedno o drugome[4].

3.1 Prednosti i nedostaci krutih maziva

U usporedbi s uljem i mastima, kruta maziva su daleko manje zastupljena u primjeni. Ulja i masti se mogu nazivati tzv. normalnim ili uobičajenim mazivima. Kruta maziva, s druge strane, se koriste u situacijama sa neobičnim okolnostima koje isključuju ulja i masti kao maziva u tim slučajevima. Prednosti i nedostaci krutih maziva uglavnom proizlaze iz manjka protočnosti.

8.2.1 Prednosti

- (a) Bez tendencije protoka, stezanja ili pomicanja, tako da mogu ostati na jednom mjestu duže vrijeme.
- (b) Minimalni rizik zagađenja okoliša ili proizvoda.
- (c) Kruta forma plus velika strukturna čvrstoća nekih krutih maziva omogućuje izradu komponenata ležajeva od njih.
- (d) Vrlo niska sklonost isparivanju im omogućuje korištenje u vakuumu.
- (e) Vrlo često korištenje na visokim ili niskim temperaturama.
- (f) Kemijska inercija omogućuje nekima od njih da se koriste u kemijski reaktivnim okruženjima.
- (g) Općenito stabilni na radioaktivnost
- (h) Mogu držati sloj maziva pod velikim pritiskom, malu brzinu ili vibracije.

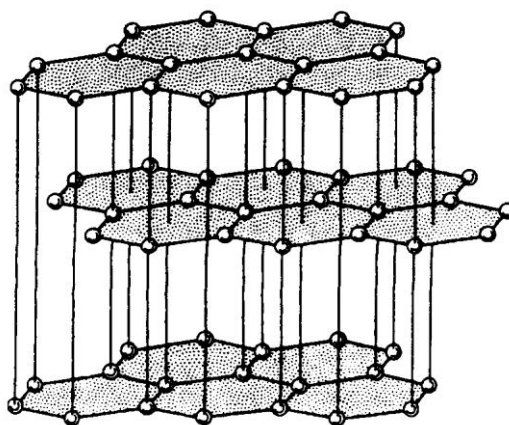
8.2.2 Nedostaci

- (a) Teško i često nemoguće dodavanje maziva ili popravak.
- (b) Neizbježno trošenje tijekom korištenja tako da imaju određen vijek trajanja.
- (c) Slaba toplinska provodnost smanjuje maksimalnu brzinu klizanja.
- (d) Širenje zbog povećanih temperatura razlikuje se od metala tako da se mogu pojaviti promjene uslijed povišene temperature ukoliko se koriste u spoju s metalima.

Ove prednosti i nedostaci se pojavljuju u različitim slučajevima kod različitih krutih maziva.[2]

3.2 Grafit

Grafit je gotovo sigurno bio prvo kruto mazivo koje se koristilo, i njegova se primjena može dokazati čak u prapovijesnom razdoblju. Grafit je sivo-crni kristalni oblik ugljika u kojem su atomi ugljika posloženi heksagonski u pravilne slojeve, kao što je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2 Heksagonalna rešetkasta struktura grafita [1]

U ovoj heksagonskog strukturi, veze između atoma ugljika unutar sloja su jake kemijske (kovalentne) veze, tako da su slojevi jaki i kristali se snažno opiru savijanju ili pucanju slojeva. Veze između slojeva su slabe (van der Waals) sile, tako da se kristali mogu jednostavno odvajati između slojeva, i slojevi lako klize jedan preko drugoga. Grafit se pojavljuje u prirodi, no prirodni grafit varira u stupnju čistoće između 80% i 90%. Može se poboljšati rafiniranjem do čak 98%. Grafit se također može umjetno proizvesti procesom

grafitiziranja, većinski udio čini naftni koks koji se grije na 2600-3600 °C. Sintetički grafit je vrlo kristalan i vrlo čist, sadržavajući prosječno 98,5% ugljika. Iako svi grafiti, prirodni i sintetički, sadrže vrlo velik udio ugljika, neki dijelovi ugljika mogu biti u ne-grafitnom obliku, a ponašanje tijekom trenja varira sa sadržajem grafita. Također se razlikuju u stupnju kristalnosti, kristalnoj orijentaciji i njihovim podmazivajućim i ostalim osobinama kao rezultat te varijabilnosti.

Višeslojna struktura grafita bi trebala u prirodnom stanju imati dobre osobine trenja. U stvari, grafit omogućava dobro trenje kad mu se dodaje vodena para ili druge kondenzirajuće pare. Tijekom Drugog svjetskog rata, kad su letjelice počele uobičajeno dosezati velike visine, otkriveno je da su im se električne četkice ubrzano trošile, tako brzo da je proces nazvan „prašenje“. Otkriveno je da se to događa zbog gubljenja apsorbirane vlage isparivanjem na niskim tlakovima na velikim visinama. Taj problem može se riješiti dodavanjem manje hlapljivog bromo-pentana, no on će ispariti upotrebom u vakuumu.

Osim ako se ne traži dobra električna vodljivost, bolje je izbjegavati primjenu grafita u vakuumu ili suhim okruženjima. Gdje god je električna vodljivost potrebna, uporaba čistog grafita će zadovoljiti potrebe i raditi duži period od poroznog grafita, prije svega zbog toga što mu treba više vremena da se ukloni apsorbirana para. Za vrlo dug period korištenja može mu se dodati molibdensulfid tako da se zadrži nisko trenje. Visokokvalitetan grafit sa vodenom parom će imati koeficijent trenja od 0.05 na visokom pritisku kontakata do 0.15 na niskom pritisku – trenje je glatko i konstantno. Nisko trenje se može održati na temperaturama od oko 200 °C, ako se može osigurati konstantna prisutnost vodenih para ili drugih odgovarajućih dodataka. U praksi je to vrlo teško, iznad 160 °C u zraku, koeficijent trenja se diže do 0,4-0,4. U većini primjena važnija je činjenica da trenje postaje nepravilnije, i pojavljuje se mogućnost grubog trenja i trošenja. Nekoliko dodataka kao što su nikal-klorid su pokazali da popravljaju trenje na određeno vrijeme u ovom temperaturnom rasponu, ali nisu široko korišteni. Iz praktičnih razloga se grafit ne koristi u temperaturnom rasponu od 200-350 °C s obzirom da je u tim uvjetima vrlo neefektivan. Međutim, u ovom temperaturnom rasponu je malo koje mazivo efektivno, i unatoč njegovom kratkom vijeku trajanja, grafit je bolje mazivo nego nikakvo. Nakon 350°C, grafit ponovo omogućava malo trenje, vjerojatno zbog površinske reakcije sa površinskim oksidom na metalnim površinama. Trenje se ponovo počinje povećavati na oko 540 °C kad grafit počinje oksidirati u zraku. Kao rezultat toga, grafit se može koristiti kao mazivo u mnogim industrijskim postrojenjima, kao što je proizvodnja žice, proizvodnja cijevi i kovanje. Također se može koristiti u kratkim periodima na višim

temperaturama jer ostavlja mali ili nimalo opasnog otpada kad oksidira, ali s nekim metalima, uključujući željezo, može prouzročiti pougljičavanje i krhkost. Grafit prijanja čvrsto uz metalne površine i prevlači se mekšim materijalima kao što su polimeri. Rubovi kristalnih ploča su tvrdi i oštri, i zbog toga abrazivni. Važno je da kristali budu orijentirani paralelno na ležajnu površinu kako bi se smanjila hrapavost i omogućilo najmanje trenje. Ako grafit nije finije obrađen, do izražaja će doći više kristalnih vrhova pa će se trenje i hrapavost povećati.

Grafit će čvrsto prijanjati za površinu bez obzira radilo se o krutom komadu (kao što je pisanje olovkom) ili pak disperzijom u tekućinama. Također može biti napravljen tako da prijanja uz upotrebu prijanjajućih povezoivača, obično epoksid i fenoli koji također mogu biti uključeni u disperziju. Velik raspon grafitnih disperzija je komercijalno dostupan, a tablica 3.1 prikazuje neke od glavnih tipova i njihovu primjenu. [1]

Tablica 3.1 Neke grafitne disperzije[1]

Tekućina	Koncentracija grafita (%)	Primjena
Voda	20-30	Podmazivanje kalupa, alata itd.
Mineralno ulje	35-40	Podmazivanje kalupa, alata itd.
Biljno ulje	10	Prirodna guma
Izopropilni alkohol	10-20	Mazivo kalupa u obliku suhog filma, sprječava lijepljenje
Poliglikol	10-20	Mazivo kod ekstremno visokih temperatura

Kao prašak ili film, grafit može izdržati opterećenje od 70 MN/m^2 ovisno o količini praška ili debljine filma. Kao i većina krutih maziva i oni imaju ograničenu brzinu klizanja. Međutim, grafit ima veću toplinski provodnost pa se može koristiti pri većim brzinama nego molibden disulfid ili polimeri. Najveći PV za grafitni prašak, film ili kruti blok je oko $0,7 \text{ MN/ms}$. Ako se ulje za podmazivanje koristi sa filmom ili krutim komadom ugljičnog grafita, PV je oko 10 puta veći zbog efekta hlađenja zbog prisutnosti ulja. Nedostaci grafita ili grafitiziranog ugljika u komadu su: strukturna slabost, poroznost i teška strojna obrada. Nedostaci se mogu popraviti impregniranjem ugljika sa metalima, no onda se trenje povećava do $0,10\text{--}0,25$, i maksimalni PV je oko $0,07 \text{ MN/ms}$. Također se potiče korozija u okruženjima gdje je prisutna slana voda.

Glavne osobine grafita kao maziva se mogu sažeti kao:

- malo trenje, 0,05 – 0,15 ovisno o pritisku,
- maksimalni PV 0.7 MN/ms u suhim uvjetima,
- dobro prianjanje,
- dobra električna i toplinska provodnost,
- mogućnost korištenja na niskim temperaturama i do 540 °C u zraku,
- slabe osobine u vakuumu ili kad je vrlo suh,
- dobre osobine u prisutnosti tekućine,
- crn i zbog toga neprihvatljiv u nekim uvjetima.

3.3 Molibden disulfid i slične komponente

Molibden disulfid su koristili rudari u Kaliforniji (takozvani Forty-niners) od 1848.-1850. godine za podmazivanje osovina na njihovim vagonima. Prirodno ga se može naći kao rudača molibdenita, i glavni je izvor molibdena. To je sirovi heksagonski molibdendisulfid, nalazi se u velikim masama i u ogromnim količinama u nekim dijelovima svijeta. Kemijska formula je MoS_2 , sa jednim atomom molibdena i dva atoma sumpora. Kao i grafit, ima heksagonalnu višeslojnu strukturu, kao i drugi ne mazivi oblici. Struktura se sastoji od dodatnih slojeva molibdenovih i sumporovih atoma.

Svaki sloj atoma molibdena je u sendviču između slojeva sumpornih atoma, a veze između molibdenovih i sumporovih slojeva su strogo kovalentne kemijske veze. Svaki trostruki sloj molekula molibdendisulfida je spojen sa sljedećim trostrukim slojem samo slabom van der Waalsovom vezom između slojeva sumporovih atoma, tako da se kristal može lagano razdvojiti između slojeva molibdendisulfida. Stoga, opet imamo materijal s malim trenjem u smjeru paralelno sa slojevima. U stvari, postoji cijeli rod kemijskih komponenti sličnih molibdendisulfidu, ali samo se molibdendisulfid može naći u prirodnom obliku. Svi ostali moraju se proizvesti sintetički i zbog toga su skupi.

Prednosti ostalih spojeva s obzirom na molibdendisulfid su vrlo ograničene. Volframovdisulfid ima višu oksidacijsku temperaturu, 500 °C u zraku, te oksidira sporije nego molibdendisulfid. Zbog toga se volframovdisulfid pojavljuje na visokim temperaturama

i plinski hlađenim nuklearnim reaktorima. Niobijumdiselenid se koristi kod električnih četkica u visokom vakuumu, zbog njegove bolje električne vodljivosti, no opet su se spojevi koji sadrže molibdendisulfid pokazali jednako tako učinkovitima. Kao rezultat toga, danas je vrlo malo interesa za te sintetičke komponente, jedino se molibdendisulfid postavlja kao komponenta visoke važnosti.

Sirovi prirodni molibdenit sadrži vrlo veliku koncentraciju nečistoća, no one su smanjene rafiniranjem na manje od 2%, a velika većina tih nečistoća je bezopasno ugljično ulje korišteno u čišćenju. Mala količina preostalog otpada je silicij i u nekim slučajevima se i on uklanja hidroklornom kiselinom, no postavlja se pitanje je li to opravdano. Kao i kod grafita, rubovi stvoreni od malih kristala molibdendisulfida su oštri, pa uklanjanje silicija daje malo, gotovo neznatno poboljšanje.

Molibdendisulfid prijanja za metal i ostale površine jače nego grafit. Koristan film može se zadržati na materijalu tako da se molibdendisulfid utrlja vunenom tkaninom ili platnom. Utrljavanje treba teći glatko i konstantno uvijek u istom smjeru, i kao rezultat dobiti ćemo sjajni plavo – crni sloj debljine 0,1 μm . Deblji slojevi, čak do 10 μm mogu se dobiti višestrukim utoljavanjem i mogu pružati dugi vijek trajanja.

Slojevi se također mogu proizvesti uranjanjem u disperziju ili raspršivanjem disperzije molibdendisulfida u hlapljiva otapala ili vodu dopuštajući tekućini da ispari. Takav sloj se vrlo lako može odstraniti, ali nakon što se utrlja postaje vrlo izdržljiv.

Vrlo tanki, snažni, izdržljivi slojevi stvaraju se tehnikom nazvanom prskanje. No, samo nekoliko proizvođača takvih slojeva je dostupno. Puno dostupniji su složeni slojevi u kojima je smola postavljena kao vezivni materijal. Smjesa molibdendisulfida i smole je raspršena kao vezivni materijal, često pod tlakom ili pak mazanjem ili umakanjem. Tekućina tada ispari i vezivni materijal tada reagira na sobnoj temperaturi ili na temperaturama do 200 °C da bi se stvorio čvrsti sloj koji će dati duži vijek trajanja. Spojeni slojevi imaju samo jedan nedostatak pred prskanim slojevima, a to je da su mnogo deblji i zbog toga vrlo teško upotrebljivi u visoko preciznim ležajevima.

Danas je u ponudi vrlo velik izbor različitih molibden disulfidnih slojeva. Za male temperature preferiraju se organska veziva kao što su fenolna, epoksidna ili silikonska smola. Za visoke se temperature koriste razna anorganska veziva kao što su natrijev silikat, aluminij fosfat ili borov oksid. Jedan od najranijih uspješnih visokotemperaturnih slojeva sadržavao je

71% molibdendisulfida, 7 % grafita i 22% natrijevog silikata kao veziva. Postepeno se grafitni dio pokazivao kao pokretač korozije u vlažnom okruženju, pa se kasnije vodilo računa o manjem korištenju grafita ili čak ne korištenju grafita. Antimon trioksid se pokazao kao koristan jer je popravljao vezane slojeve, vjerojatno smanjivanjem stupnja oksidacije.

Neki od mekanih spojenih slojeva se mogu ostrugati oštrim vrhovima, ali i naneseni slojevi se mogu utisnuti da se napravi čvršći, izdržljiviji sloj. To ima prednost u nekim situacijama primjene zbog toga što su mnogo tanji, pa se može držati veća kontrola nad tolerancijama. Tablica 3.2 pokazuje popis karakteristika četiri glavna tipa molibden sulfidnog sloja. Svaki od tih slojeva daje najbolje osobine ako je metalna površina obrađena s točnošću od 0,5 – 1 μm , unatoč tome što je površina još tretirana nekim od sljedećih materijala:

Čelik	fosfat ili sulfid
Aluminij	anodirati
Magnezij	dikromat
Titan	anodirati ili fosfor-florid

Tablica 3.2 Molibden disulfidnih filmova[2]

Tip filma	Debljina filma (μm)	Karakteristike filma
Polirani	0,1-10,0	vrlo nisko trenje, tanak, izdržljiv
Prskani	0,2-2,0	nisko trenje, vrlo tanak, izdržljiv
Organski vezani	2,0-40,0	nisko trenje, debeo, visoko trošenje
Anorganski vezani	3,0-40,0	nisko trenje, debeo, velik temperaturna širina

Koeficijent trenja takvih filmova varira od 0,03 kod velikog kontaktnog pritiska do 0,1 kod malog pritiska.

Kao i kod grafita, količina kristalnih vrhova se povećava ako su zrna praha prefina, a najčešće je najbolja veličina čestica od 2 – 3 μm . Sloj bi se trebao prvo upotrijebiti na manjem opterećenju prije nego li ga se potpuno opteretiti, jer se predpokretanjem postiže kompaktniji

sloj zbog čega je i jači. Slojevi se ne drže zajedno tako dobro u prisutnosti tekućina, ali ipak disperzija molibdendisulfida se često koristi u uljima i mastima za podmazivanje. Postoje različita mišljenja o vrijednosti molibdendisulfida u motornim uljima, jer neki raniji eksperimenti pokazuju da se javlja veće trošenje korištenjem ovakvih ulja. Noviji testovi na velikim kamionima nisu pokazali takve nedostatke, ali su pokazali malu uštedu na potrošnji goriva, pretpostavlja se zbog smanjenja trenja. Koncentracije 3-5% u mastima omogućuju povećanje opterećenja, pa se ovaj spoj može koristiti kod jako opterećenih ležajeva. Još jedna od prednosti je da ukoliko je mast zbog nekog razloga nestala iz ležaja, ostatak sloja molybdendisulfida može pružati zadovoljavajuće podmazivanje za kraći period. Masti koje sadrže 1% molibdendisulfida se koriste za ležajeve kotača, dok se masti koje sadrže 1-3 % molibdendisulfida koriste kod dijelova šasijske. Masti koje sadržavaju više od 3% molibdendisulfida se ne bi trebale koristiti kod ležajeva s velikom rotacijskom brzinom.

Molibdendisulfid se također može umetnuti u metalne ili polimerske kompozicije, koje se mogu koristiti za proizvodnju ležajeva ili ostalih komponenti s niskim trenjem. Koeficijent trenja tada postaje malo veći, možda 0,1 do 0,3 ovisno o kompoziciji opterećenju i brzini. Molibdendisulfid počinje oksidirati na 350 °C u zraku, no može ga se kratko koristiti na temperaturama do 450 °C. Oksidacijom nastaje molibden oksid (MoO_3) koji sam po sebi ima svojstva maziva na većim temperaturama, no vrlo brzo se troši. U vakuumu se problem oksidacije ne pojavljuje, a neki testovi su potvrdili uspješnost podmazivanja i na temperaturama do 1000 °C u visokom vakuumu. Maksimalno opterećenje ovisi o obliku u kojem se molibdendisulfid koristi, no može biti ekstremno veliko. Zbog njegove slabe toplinske vodljivosti, maksimalna brzina klizanja je ograničena. Granični PV također ovisi o obliku u kojem je molibdendisulfid korišten, ali može biti od prilike 3,5 MN/ms. Vijek trajanja u vakuumu određen je debljinom sloja i brzinom trošenja, ali u zraku je dokazano da molibdendisulfid oksidira i ispod 350 °C, vjerojatno zbog efekta trenutnog porasta temperature uslijed trenja. Gornji sloj će nestati kad izgubi koheziju zbog oksidacije. Osim oksidacije, otporan je na više kemikalija, no neotporan na jako oksidirajuće kiseline i lužine.

Sve u svemu, molibden je vrlo koristan materijal koji se koristi tamo gdje se masti i ulja ne mogu koristiti. Njegove osnovne karakteristike se mogu sažeti na sljedeće:

- malo trenje, 0,03 – 0,1, ovisno o opterećenju
- maksimalni PV oko 3,5 MN/ms
- izvrsno prianjanje, posebno kad je suh

- iskoristiv na niskim temperaturama i do 350 °C u zraku
- izvrsne osobine u vakuumu
- temperaturna granica u vakuumu dostiže 1000 °C
- nosivost velikih opterećenja
- crn i zbog toga neprihvatljiv za neke procese. [1]

3.4 Ostala anorganska kruta maziva

Mnogo anorganskih komponenti ima korisne osobine za podmazivanje, ali ni jedna od njih nije iskorištena u široj primjeni. To je zbog toga što imaju svojstva formiranja slojeva ili zbog kompliciranih načina nanošenja ili njihove cijene, ili nekog drugog problema. Neke od tih komponenti, i njihove karakteristike, su sažete u tablici 3.3.[1]

Tablica 3.3 Karakteristike nekih anorganskih krutih maziva[1]

<i>Materijal</i>	<i>Karakteristike</i>
Kalcij fluorid	upotrebljiv između 400-900 °C, nisko trenje, malo trošenje
Grafit fluorid	upotrebljiv do 470 °C, nisko trenje, nisko trošenje
Molibden trioksid	upotrebljiv između 300-1000 °C, nisko trenje
Bor nitrid	upotrebljiv između 300-950 °C (1700 °C bez prisutnosti kisika), trenje je oko 0,2-0,3
Olovo monoksid	upotrebljiv između 200-700 °C, nisko trenje i trošenje

3.5 PTFE i slični polimeri

PTFE (polytetrafluorethylene) je polimer tetrafluoetilena, koji je u stvari etilenski plin (C_2H_4) u kojem su svi atomi vodika zamijenjeni atomima fluorina.

PTFE se često naziva i Teflon, no to je samo pojednostavljen trgovački naziv proizvoda koje proizvodi Dupont, kao što je i Fluon trgovački naziv tvrtke ICI. Teflon je čvrsti bijeli materijal sa izgledom voska, tvrd na dodir ali se lako deformira i reže.

PTFE se obično proizvodi taljenjem uz visok tlak i na temperaturi višoj od 300 °C. Teško je precizno oblikovati veće dijelove, no ti se dijelovi mogu strojno obraditi uzimajući u obzir brzinu i debljinu reza prije nego što se materijal toplinski oblikuje. Spajanje PTFE sa metalima je oduvijek bilo teško, no tretman metala vrućim lužinama uspješno pripremaju površine za koju PTFE može prijanjati, a na tržištu postoje i ljepljiva za koja se tvrdi da su prikladna. Također treba imati u vidu da PTFE može otpustiti otrovne i iritirajuće pare, isto kao i ostali fluorirani polimeri ukoliko se temperatura poveća tijekom strojne obrade.

PTFE je stabilan u upotrebi do gotovo 300 °C, no mijenja stanje na 325 °C i nemože se koristiti iznad te temperature. Također se može koristiti na vrlo niskim temperaturama, gotovo ispod -200 °C ili nižim u tekućim plinovima. Međutim, postoje dokazi da se brže troše na niskim temperaturama. Također je vrlo otporan na oksidaciju i može se koristiti kao mazivo ili brtva u sustavima s kisikom.

Privlačne sile između dugih ravnih lanaca molekula su slabe, tako da PTFE ima slabu mehaničku čvrstoću. Iz istog razloga ti dugački lanci molekula klize jedan po drugome i to omogućuje malo trenje. U pogledu na stabilnost i male atomske sile, nije jasno zašto PTFE stvara glatke i jako prijanjajuće slojeve koji dobro prijanjaju uz metal, vjerojatno bolje od grafita. PTFE je najkorisniji za podmazivanje od svih polimera, zbog njegovog posebno niskog trenja. U suhom klizanju uzduž metala, trenje čistog PTFE-a može biti nisko čak do 0,03 na visokom opterećenju i maloj brzini, no povećava se na 0,1 ili više kod malog opterećenja i velikoj brzini. Održavanje malog trenja i trošenja ovisi o sloju glatkog filma na obje površine. Taj sloj vrlo brzo nastaje prijenosom na čiste metalne površine koje klizu uzduž PTFE-a. Prisutnost tekućina smeta sloju, i unatoč malom trenju, uz prisutnost tekućina trošenje se povećava do neprihvatljivih razmjera. Međutim, u mnogo primjena civilnog inženjerstava, kao što su ležajevi mostova, PTFE kompoziti su se pokazali kao izvrsno mazivo i dugotrajan materijal, čak i kad su uronjeni u vodu. U idealnim uvjetima je otpornost na trošenje PTFE-a vrlo visoka, a uporabom ojačanja može se dodatno povećati. Korisna ojačanja uključuju staklena vlakna, ugljična vlakna i molibdensulfid. No sa svakim od njih raste i koeficijent trenja, često do 0,1 ili 0,2. Neojačani PTFE polako slabi pod opterećenjem, i može nestati iz ležaja. Maksimalni PV

je oko 60 kN/ms. Upotreba ojačanja povećava njegov otpor prema deformiranju. U širokoj primjeni su dvije vrste ojačanog PTFE-a. U jednoj, PTFE je umetnut u pore sinterirane brončane trake koja ima čeličnu zadnju stranu zbog ojačanja. U drugoj vrsti, PTFE u obliku vlakana je isprepleten sa staklenim vlaknima i sve zajedno je impregnirao sa fenolnom smolom, koja cijelu smjesu fiksira na čeličnu traku. Maksimalan PV za sve vrste je isti, oko 3,5 MN/ms. Postoji mnogo drugih komercijalno dostupnih kompozita koji sadržavaju PTFE, a nekoliko ih je prikazano u tablici 3.4.[1]

Tablica 3.4 Neki komercijalni PTFE kompoziti [1]

<i>Tip</i>	<i>Ispuna/ojačanje</i>	<i>Ispuna (%)</i>	<i>Trenje</i>	<i>PV ograničenje (MN/ms)</i>
Rulon A			0,12-0,14	0,5-0,7
Fluorocomp 103	Staklena vlakna	15	0,14	0,35-0,5
Fluorocomp 174	Staklena vlakna, molibden disulfid	5-15	0,14	0,4-0,6
Fiberslip	Staklena vlakna		0,10-0,20	3,5
Glacier DU	Sintetska bronca, olovni prah		0,10-0,20	3,5

Bijela boja PTFE-a je prednost u nekim industrijama, kao što je tekstilna, gdje tamna boja grafita ili molibdendisulfida nije prihvatljiva. Nekoliko polimera je slično PTFE-u u nekim aspektima. Svi oni imaju veće trenje, no daju neke kompenzacije u smislu podnošenja većeg opterećenja, jače strukturne čvrstoće ili boljeg prijanjanja uz metal. Osobine PTFE-a i nekih od tih drugih polimera su uspoređeni u Tablici 3.5.

Tablica 3.5 Svojstva nekih fluoriranih polimera [1]

<i>Polimer</i>	<i>Trenje</i>	<i>Maksimalna temperatura (°C)</i>	<i>Karakteristike</i>
Neispunjeni PTFE	0,04-0,12	290	mali otpor na trošenje, teško obradiv
Ispunjeni PTFE	0,1-0,2	290	veliki otpor na trošenje, teško obradiv
PTFCE	0,12-0,3	200	lako obradiv
Ispunjeni PVF		150	otporan na trošenje, lako obradiv
Ispunjeni PVF/TFE	0,10-0,13	150	otporan na trošenje, lako obradiv

Zaključno, važne karakteristike PTFE-a su:

- vrlo malo trenje, od 0,03 do 0,1
- visok stupanj trošenja u čistom stanju,
- deformacija pod opterećenjem, u čistom stanju,
- ojačanja produžuju vijek trajanja smanjuju deformaciju, ali povećavaju trenje,
- mogu se koristiti od -200 °C do +300 °C,
- vrlo otporni na kemijska djelovanja,
- bijela boja poželjna u nekim primjenama,
- jednostavna strojna obrada.

3.6 Najlon

Najloni su grupa linearnih polimera, kemijski poznatiji kao poliamidi. Česte vrste najlona su najlon 6, najlon 6/6, najlon 6/10, najlon 11 i najlon 12. Njihove osobine ovise o različitim faktorima, no opaske se mogu odnositi na sve vrste najlona.

Oni su izdržljivi polimeri sa jakom mehaničkom snagom. Rastežu se ili dugotrajno deformiraju kad su pod opterećenjem, ali u mnogo manjoj mjeri od neojačanog PTFE-a. Njihove mehaničke karakteristike se mogu popraviti sa ispunama ili ojačavanjem vlaknima. Imaju vrlo jako otpornost na kemijski utjecaj, no ipak ne tako dobru kao PTFE

ili FEP. Također su netolerantni na vlagu jer upijaju vodu koja ih čini napuhnutim i mekanim, rezultirajući smanjenjem izdržljivosti i to faktorom 3 prema 1 za najlon 6/10 i preko 5 prema 1 za najlon 6.

Najloni tvore glatke slojeve na metalnim površinama, i kad nisu podmazani imaju mali faktor trenja, od 0,1 do 0,2 pri maloj brzini ovisno o opterećenju i temperaturi. Njihovo trošenje je također malo kod malih brzina, čak do 50 puta manje nego kod PTFE. Na većim brzinama, preko 1 m/s, trenje se povećava zbog taljenja površine. Ležajne karakteristike se bitno povećavaju ako mu se doda neki dodatak, kao recimo PTFE ili molibdendisulfid, te ojačanja kao što su ugljična vlakna. Ležajevi moraju biti dizajnirani s velikim otvorima da bi se mogli nositi s efektom otjecanja vlage i porasta temperature.

Najloni su posebno dobri za upotrebu tamo gdje su prisutne tekućine, i u širokoj su primjeni sa vodom i uljnim mazivima, gdje su pokretni dijelovi mali, malo opterećeni i sporo se gibaju. U niskoviskoznim tekućinama kao što je voda, imaju prednost pred metalnim komponentama, jer ukoliko se površine taru jedna uz drugu postoji manja mogućnost oštećenja. Tekućina hladi površine tako da mogu djelovati na većim brzinama od onih kad su suhi.

Najlon se često koristi za male brzine (npr. motori prozora i brisača automobila) i klizne ležajeve (npr. ležajevi vrata) zbog jednostavne proizvodnje i niske cijene proizvodnje, a s obzirom da su tolerancije velike nije potrebna fina završna obrada. Takve komponente su obično podmazivane mastima tako da to tehnički nije kruto podmazivanje. Međutim, kad mast više nije prisutna često će nastaviti sa radom. Tablica 3.6 prikazuje neke osobine najlona.[1]

Tablica 3.6 Osobine različitih najlona [1]

<i>Tip najlona</i>	<i>Trenje</i>	<i>Otpor na trošenje</i>	<i>Maksimalna temperatura (°C)</i>
Neispunjeni najlon 6	0,2-0,3	prolazno	100
Ispunjeni najlon 6	0,2-0,4	dobro	150
Neispunjeni najlon 6/6	0,1-0,28	slabo	130
Ispunjeni najlon 6/6	0,2	prolazno	200
Neispunjeni najlon 6/10			110
Ispunjeni najlon 6/10			200

3.7 Acetali

Acetali su slični najlonima u upotrebi, više se koriste s podmazivanjem nego bez podmazivanja. Kod suhog klizanja koeficijent trenja je između 0,1 i 0,4 ali može se smanjiti na 0,07 korištenjem PTFE-a kao ispunu. Troši se otprilike kao najlon, ali to se popravljiva ispunama i ojačanjima. Temperaturno ograničenje je samo oko 110 °C. U primjeni kao mazivo, acetali se odlično nose, posebno u smislu trošenja u slučaju niskih brzina i velikog opterećenja tako da se održava stalni dodir površina. Također, acetali imaju prednost da se neće oštetiti ako zakaže podmazivanje, pa se mogu preporučiti za primjenu tamo gdje podmazivanje nije stalno. Glavni nedostatak je da se teško veže na metalne komponente pa se teško postavljaju na dijelove opreme. Zbog toga se, gdje je to moguće, koriste komercijalno dostupne vrste ležajeva kao što je Glacier DX, u kojima je acetal zarobljen u brončanom sloju.[1]

3.8 Polietereeterketoni (PEEK)

Polietereeterketoni su polimeri sa dobrim toplinskim i tribološkim osobinama, kao i ostalim dobrim mehaničkim svojstvima i kemijskom inertnošću. U suhom klizanju se koeficijent trenja, neojačanog materijala, kreće od 0,15 na malim brzinama i 200 °C do 0,58 na većim brzinama i 20 °C. Materijal za ležajeve je ojačan sa ugljičnim vlaknima i podmazan sa grafitom ili PTFE-om te ima koeficijent trenja u suhom klizanju između 0,11 i 0,17 preko širokog raspona temperatura i brzina klizanja. Trošenje ojačanog polimera je manje nego onog za najlon, ali veće od trošenja acetala. PV suhog trenja je preko 10 MN/ms. Granična temperatura za konstantnu upotrebu je 260 °C, a za kraće periode čak i do 300 °C. PEEK se jednostavno dodaje ubrizgavanjem i može biti dodan metalnim komponentama.[1]

3.9 Metali kao kruta maziva

Mekani metali poput olova lako se mogu deformirati, tako da se u određenim okolnostima mogu koristiti kao kruto mazivo.

Tablica 3.7 Svojstava nekih metalnih maziva [1]

<i>Metal</i>	<i>Točka taljenja (°C)</i>	<i>Tvrdoća (mohova ljestvica)</i>
Galiј	30	1
Indij	155	1
Kositar	232	1,8
Talij	300	1,2
Olovo	327	1,5
Bariј	704	
Srebro	961	2,5
Zlato	1063	2,5

S obzirom da su mekani, ne mogu podnijeti velika opterećenja bez deformacija, tako da se koriste kao tanki slojevi na tvrdim metalnim površinama. Koeficijent trenja je malen, otprilike 0,3, mogu se koristiti na prilično visokim temperaturama i imaju dodatnu prednost dobre toplinske vodljivosti. Tablica 3.7 nam pokazuje točke taljenja nekih metala koje se najviše koriste kao maziva. Kod malih brzina i malih opterećenja, metali mogu biti upotrebljavani na temperaturama blizu svojih točaka taljenja, međutim na većim brzinama ili opterećenjima, zbog trenja se povećava temperatura površine i može doći do taljenja. Za razliku od srebra i zlata, metalni slojevi se prije svega koriste kao maziva u vakuumu, smatra se da oksidacija nije pogodna za glatko klizanje kad se koriste u zračnoj atmosferi. Sloj kositra na površini omogućuje zadovoljavajuće podmazivanje, no to je potrebno samo za kratke periode. Slojevi su debljine od 0,25 do 1 μm , i vrlo su glatki. Trenje se povećava bilo s debljim ili tanjim slojevima. Slojevi srebra i barija se uspješno koriste kod slabo opterećenih kugličnih ležajeva u visokom vakuumu. Srebro i zlato su testirani za upotrebu u viskom vakuumu u svemirskim letjelicama. Prah olova i bakra se također koristi za visoke temperature, gdje se njihovo omekšavanje na visokoj temperaturi koristi za smanjivanje trenja. [2]

3.10 Kompoziti

Bilo koji materijal koji je sastavljen od dvije ili više faza naziva se kompozit.

Tablica 3.8 Materijali korišteni u kompozitnim mazivima [1]

<i>Matrica</i>	<i>Mazivo</i>	<i>Ojačavajući prah</i>	<i>Vlakna</i>	<i>Dodaci</i>
PTFE	PTFE	Grafit	Staklena	Antimon trioksid
Najlon	Molibden disulfid	Ugljik	Ugljična	Olovo fosfat
Acetal	Grafit	Molibden disulfid	Čelična	Natrij nitrid
Polimid	Olovo	Olovo	Bakrena	Aluminij
Bronca	PTFCE	Bakar	Terilen	Butilftalat
Ljevano željezo	Niobijdiselenid	Silicij	Nomex	
Nikal	Olovo monoksid	Aluminij	Rayon	
Srebro	Brončani oksid	Liskun		

Poznati primjer su staklena vlakna, koja sadrže vlakna stakla raspršena u epoksidnoj ili fenolnoj smoli, i većina guma koje sadržavaju crni ugljik ili druge ispune. Za upotrebu u ležajevima, većina polimera je ojačana staklenim ili ugljičnim vlaknima, a mnogi od njih imaju dodan PTFE ili molibdendisulfid da bi se smanjilo trenje. Tablica 3.8 prikazuje neke materijale koji se mogu koristiti u kompozitima, a s obzirom da se mogu mijenjati vrste materijala i koncentracija pojedinog materijala, možemo zaključiti da je broj različitih kompozita ogroman. Sa nekoliko primjera ćemo prikazati način sastavljanja kompozita.

- (a) Glacier DU – sadrži poroznu sintetsku brončanu traku sa čeličnom trakom otrga. Pore brončane trake su ispunjene PTFE-om u kojem je raspršen olovni prah, tako da površinu prekriva PTFE sa raspršenim olovom. Čelična traka daje strukturnu čvrstoću dok olovni prah smanjuje trošenje PTFE-a i poboljšava klizanje.
- (b) Duroid 5813 – tipični komercijalni kompozit koji sadrži PTFE sa ojačanjima od staklenih vlakana (15-25%) i molibdendisulfida (3-5%). Staklena vlakna daju visoku strukturnu čvrstoću, dok molibdendisulfid smanjuje trošenje i poboljšava klizanje.[1]

3.11 Dijamant kao ugljik (DLC – Diamondlikecarbon)

DLC je potpuno drugačiji u puno različitih pogleda od ostalih suhih maziva. Ima tvrdi površinu, obično se nanosi na metalne površine nekim fizičkim i kemijskim procesom. Ti procesi uključuju magnetsko raspršivanje, plazmu pobuđenu zrakama elektrona, katodni luk i radio frekvencijsko kemijsko isparavanje pomoću plazme. DLC se sastoji od tankog sloja amorfnog ugljika, sa tvrdoćom od oko 1000 do 2000 VPN-a (Vickersov broj). Često se dodaju drugi elementi, naročito vodik, dušik ili silicij. Trenje i trošenje ovise o uvjetima primjene i drugim elementima koji su prisutni, a koeficijenti trenja u suhom ležaju su između 0,015 i 0,7. DLC se najviše koristi u magnetskim uređajima za pohranu podataka, ponajviše tvrdim diskovima, koji su najčešće podmazivani tankim slojem perfluoropolietera. Vrlo su rijetke primjene u mehaničko-inženjerskim namjenama, no čini se da imaju potencijala za upotrebu u područjima u kojima tvrde površine klize u prisutnosti neviskoznih tekućina, kao što su pumpe za automobilska goriva. Trenutno je DLC u fazi istraživanja, ali vjeruje se da će postati vrlo važan u skoroj budućnosti.[2]

3.12 Odabir krutih maziva

Odabir krutih maziva sastoji se od dva dijela. Prvi dio uključuje odluku o tome treba li se kruto mazivo koristiti umjesto ulja, masti ili plinovitih maziva. Drugi dio uključuje odluku o tome koje od dostupnih maziva je najprikladnije za željenu primjenu. Prva odluka ovisi o prednostima i nedostacima krutih maziva u odnosu na ulja i masti.

Kruta maziva se primjenjuju kad je zadovoljen jedan od sljedećih faktora:

- Previsoka temperatura za ulja i masti.
- Preniska temperatura za ulja i masti.
- Okolina visokog vakuuma.
- Važnost izbjegavanja onečišćenja.
- Reaktivne kemikalije ili radioaktivna okolina u blizini mjesta podmazivanja.
- Oprema treba raditi brzo i pouzdano nakon dugog skladištenja, npr. sigurnosne naprave ili projektili.
- Velika opterećenja s malom brzinom klizanja.
- Vibrirajući kontakti.

Čak i u slučajevima da su zadovoljeni ovi uvjeti, odluka možda nije očita, jer sustav često može biti konstruiran tako da omogući upotrebu ulja ili masti. Na primjer, dodatno zagrijavanje ili hlađenje može omogućiti korištenje ulja ili masti, brtvama se može zaštititi sustav od visokog vakuuma ili reaktivnih kemikalija itd. Kao kod svakog konstruiranja opreme, odluka postaje uravnoteženje prednosti i nedostataka različitih mogućih rješenja. Na kraju krajeva odluka o korištenju krutih maziva često je temeljena na jednostavnosti konstrukcije koja je moguća u tom slučaju, kao i složenost korištenja ulja i masti u tim uvjetima.

Drugi dio procesa odabira maziva ovisi o osobinama pojedinih krutih maziva, te je napravljen sažetak bitnih osobina koje će utjecati na odabir. Također se mora imati na umu da se mogu dobiti kompromisi između više osobina krutih maziva ukoliko se stave dva ili više krutih maziva u kompozit.[1]

3.13 Konstruiranje krutih maziva

Kruta maziva se troše tijekom upotrebe. To utječe na njihov životni vijek, osim ako ne postoji neki sustav za obnovu. Nadalje, trošenje uzrokuje probleme u samom ležaju. U većini primjena obnavljanje krutih maziva neće biti moguće, te se potrebna količina krutog maziva mora implementirati odmah na početku. Činjenica da su kruti, znači da imaju svoj oblik i stanje, pa je važan dio konstruiranje krutih maziva, odluka u kojem obliku i stanju je mazivo potrebno, kako će se proizvoditi, i kako će biti ugrađen u sustav.[1]

3.14 Vijek trajanja

Dvije osobine krutih maziva se moraju znati da bi se mogao isplanirati njihov učinak i vijek trajanja. Prva osobina je kombinacija brzine i opterećenja na kojem mazivo može biti korišteno, zatim PV faktor te maksimalan pritisak i dopuštena brzina klizanja. Zadnje dvije osobine nisu često navedene te je teško dobiti točne podatke. Neki podaci kao što su PV faktor, pritisak i brzina klizanja može se naći u tablici 3.9, no nisu uvijek točni.

Tablica 3.9 Približne maksimalne vrijednosti brzine i opterećenja krutih maziva [1]

Kruto mazivo	Granični (MN/ms)	PV	Maksimalna brzina (m/s)	Maksimalni tlak (MN/m)
Grafit	0,7		0,5	70
Molibden disulfid	3,5		0,2	2000
Neispunjeni PTFE	0,06		0,01	10
Ispunjeni PTFE	0,5		0,02	100
Ojačani PTFE	3,5		0,1	400

Druga važna osobina je vijek trajanja. Dokazano je da se s nekim krutim mazivima i mnogim drugim materijalima koji se blago troše, količina materijala koja se izgubi trenjem ovisi samo o kontaktnom opterećenju (ne pritisku) i totalnoj duljini klizanja. Ovo se pravilo primjenjuje sve dok se ne prekorače maksimalni PV, pritisak i brzina. Ako je uklonjeni volumen proporcionalan opterećenju i dužini klizanja, možemo napisati:

$$\text{volumen (mm}^3\text{)} = k \times \text{opterećenje (N)} \times \text{dužina (m)}$$

gdje je k konstanta nazvana specifični koeficijent trošenja. Gornja jednadžba može biti napisana kao:

$$k = \frac{\text{volumen}}{\text{opterećenje} \times \text{dužina}}$$

gdje k ima jedinicu mm³/Nm. Posljednjih godina postalo je pravilo navoditi specifični koeficijent trošenja za različita kruta maziva. Ako je poznato totalno opterećenje na ležaj, kontaktno područje i specifični koeficijent trenja, može se izračunati totalna dubina trošenja nakon određene dužine klizanja. [1]

3.15 Primjena krutih maziva

Ako se kruto mazivo koristi u obliku slojeva, trebaju se slijediti upute proizvođača o pripremi, primjeni i debljini sloja. Složeni slojevi su slični bojanim slojevima, i mogu biti nanoseni na više načina, ali debljina za efektivno podmazivanje je mnogo tanja od dobrog bojanog sloja. Utisnuti slojevi mogu biti upotrebljavani do debljine 10 μm. Tamo gdje je kruto mazivo u obliku sirovog komada, kao što je najlon ili ojačani PTFE, problem je mehanička obrada

komponenata na traženi oblik kako bi se ista mogla umetnuti u sistem. Mehanička obrada mnogih mazivih polimera se mora odvijati pod stalnim hlađenjem kako bi se izbjegla deformacija uslijed promjene temperature. Sklapanje opreme je ponekad teško zbog male strukturne čvrstoće i drugačijih toplinskih širenja. Za sad, kruta maziva nije moguće obnavljati tijekom primjene, međutim postoje neke tehnike kojima je to donekle moguće. Molibdendisulfidni prah se ponekad stavlja u kuglične ležajeve i zupčanike zračnim ubrizgavanjem, međutim tehnika se ne koristi u široj primjeni. Molibdendisulfid i grafit je moguće dostaviti na mjesto sa zapaljivim materijalom, koji zatim ispari, no nije lako dobiti jednakomjernu raspodjelu. [1]

3.16 Neke primjene krutih maziva

U smislu brojeva, primjene krutih maziva su u kućanstvu češće nego u inženjerstvu, zajedno sa grafitom u olovkama i PTFE u neljepljivim tavama te ostalim korisnim pomagalima. PTFE je također koristan kod gradnje umjetnih skijaških staza i za podmazivanje skija. Najlon se koristi kod ležajeva i zupčanika u strojevima za pranje rublja, brisačima u automobilu, podizačima stakla u automobilu i mnogim drugim proizvodima potrošača. U inženjerstvu, kruta maziva se koriste gotovo u svim tipovima komponenti, uključujući ravne i rotacijske ležajeve, klizne ležajeve, zupčanike, brtve, električne četkice, kočnice i spojke. [1]

3.17 Klizni ležajevi

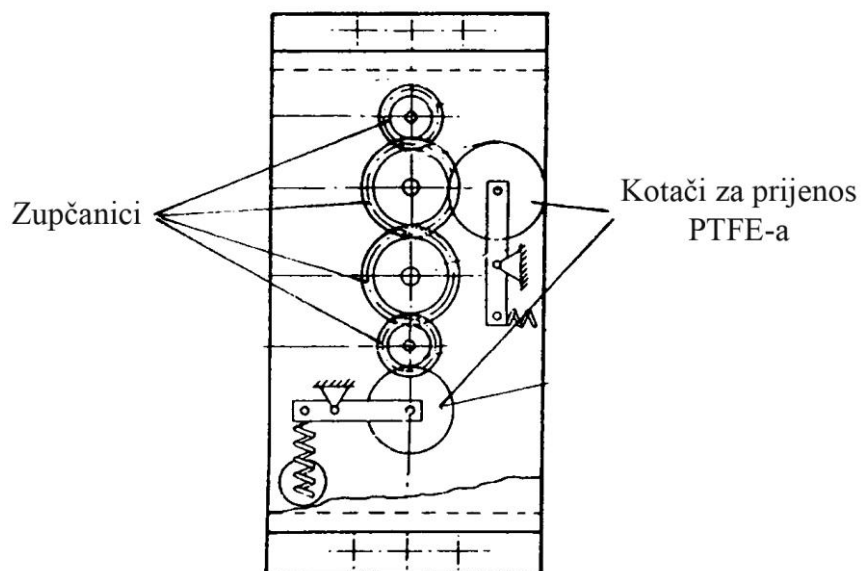
PTFE je vjerojatno najčešće korišteno kruto mazivo za klizne ležajeve. Mnogi od njih su jednostavni cilindrični dijelovi sa čistim PTFE-om korišteni za lakša opterećenja, i sa ojačanim PTFE-om za veća opterećenja. Složeniji kompoziti PTFE-a se koriste u kritičnim slučajevima kao što su potporni ležajevi mostova. Molibdendisulfid se koristi kod kliznih površina svih oblika, jer se jednostavno može nanositi na metalne površine. Također se koristi kao dopuna u nekim PTFE ležajevima. [1]

3.18 Kuglični ležajevi

Mnoge različite tehnike su isprobane za podmazivanje kugličnih ležajeva krutim mazivima. Danas je najčešća primjena ojačanog PTFE kaveza sa molibden sulfidom kao dopunom. Kuglice se trljaju o kavez i tako se prekrivaju PTFE slojem i prenose ga u ležaj. [1]

3.19 Zupčanici

Najbolja tehnika za kruto podmazivanje je također prijenos maziva do zuba zupčanika. Slika 3.3 pokazuje jednu od mogućih konstrukcija za prijenos PTFE-a ili molibdensulfida do zubaca zupčanika.



Slika 3.3 Prijenos maziva između zupčanika [1]

4. PLINOVITA MAZIVA

Plin se može koristiti kao mazivo u jednakoj mjeri kao što se ulje koristi u hidrodinamičkim ležajevima. Glavna razlika proizlazi iz činjenice da plin ima mnogo nižu viskoznost od tekućina. Hidrodinamičko podmazivanje već je objašnjeno u prethodnim poglavljima: opterećenje koje može podnijeti određena površina određene hrapavosti ovisi o viskoznosti i brzini maziva. Zbog vrlo niske viskoznosti plinova u usporedbi sa uljem, općenito se razlikuje podmazivanje plinom na sljedeće načine:

- radne brzine su veće,
- opterećenja su niža,
- završne obrade površina su finije,
- zračnosti su manje, zbog optimalnog preuzimanja opterećenja i zbog smanjenja protoka plina,
- tolerancije ležajeva moraju biti vrlo uske.

Opterećenje koje preuzima plinski ležaj može se povećati ako se plin dobavlja pod visokim tlakom tako da ekstremno visoki dobavni tlak preuzima opterećenje. Takvi ležajevi su poznati kao „vanjsko tlačni“ ležajevi. Ležajevi kod kojih opterećenje preuzima vanjski tlak, razlikuju se od onih kod kojih opterećenje preuzima brzina, na sljedeće načine:

- mogu raditi puno sporije ili čak stacionarno
- mogu imati slabije (grublje) obrađenu površinu, iako obično nemaju
- mogu preuzeti veće opterećenje

Međutim, za efikasan rad potrebno je smanjiti potrebni volumen plina na minimum. Kao posljedica, u praksi ležajevi visokog vanjskog tlaka također imaju male zračnosti, uske tolerancije i vrlo kvalitetno obrađenu površinu. Osnovna konstrukcija ležaja nije puno kompliciranija nego ona za uljno podmazivanje, ali je složena zbog zahtjeva za glatkim površinama i uskim tolerancijama. S obzirom na to, plinski ležajevi predstavljaju visok nivo inženjerske preciznosti, a njihovo konstruiranje i proizvodnju trebaju izvoditi stručnjaci. Tehnologija plinskih ležajeva je zapravo stvar konstrukcije i proizvodnje. [1]

4.1 Svojstva plinova kao maziva

Bilo koji plin se može koristiti kao mazivo u plinskim ležajevima, pod uvjetom da je dovoljno čist i da ne reagira sa ostalim materijalima u sustavu. Kruti zagađivači mogu uzrokovati dva problema. Prvi problem je da se veće čestice mogu zaglaviti između površina ležaja, uzrokujući oštećenja površina ometajući tako i stabilnost kretanja. Ležajevi s vanjskim tlakom trebaju imati zračnosti reda veličine $25\mu\text{m}$, jednako kao i ležajevi podmazivani uljem, kako bi filtracija nominalne veličine od $10\mu\text{m}$ bila zadovoljavajuća.

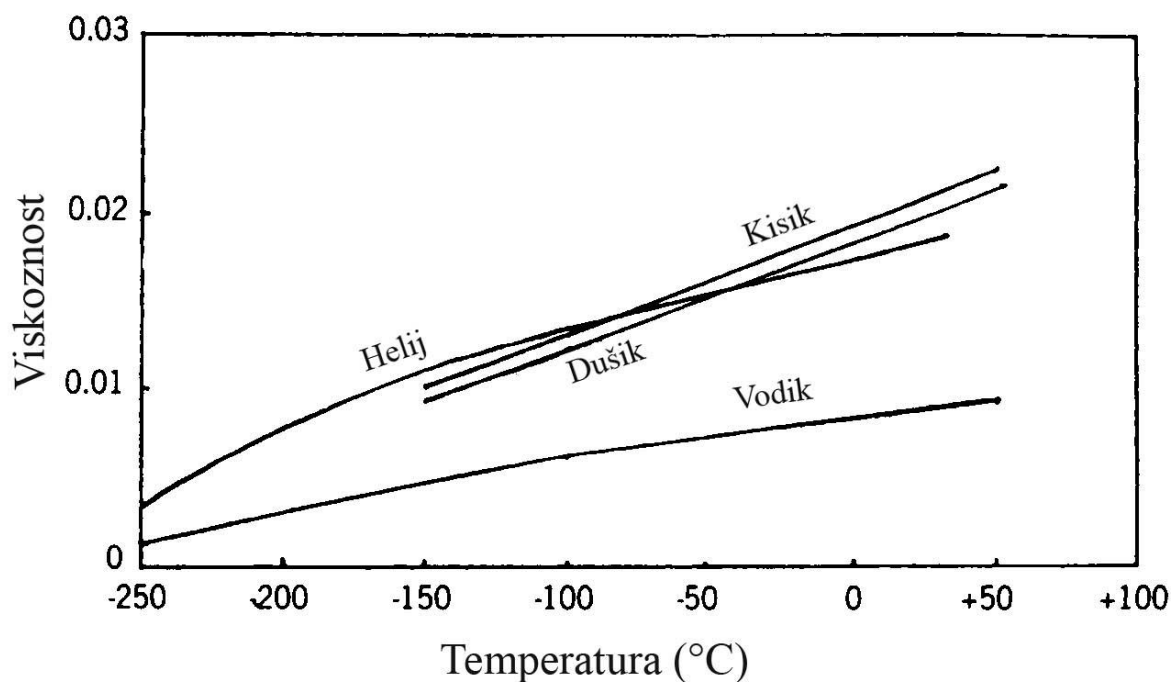
Drugi problem s krutim zagađivačima je da mogu uzrokovati eroziju površina, posebice tamo gdje je velik protok. Erozija je povezana sa ukupnom koncentracijom čestica i njihovom veličinom. Erozija se može smanjiti izbjegavanjem oštih promjena u smjeru protoka plina. Kod samotlačnih plinskih ležajeva zračnosti mogu biti mnogo manje, zbog toga je potrebna i veća čistoća. S druge strane volumni protok je u principu nizak, a zrak često recirkulira kućištem pa je potrebno dobro brtvljenje.

Tekući zagađivači mogu prouzročiti probleme ako se zadržavaju na površinama ležaja ili na brzo gibajućim komponentama, uzrokujući lijepljenje ili nestabilnost. Isto važi i za pare koje mogu kondenzirati u ležajevima. Korištenjem plinovitih maziva uklanjamo jedno od glavnih ograničenja tekućih maziva, a to je raspon temperature rada. Sve tvari koje su tekuće na normalnim temperaturama, na $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ će biti krute, a plinovite na $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plinovi mogu postojati na bilo kojoj temperaturi ukoliko je nizak tlak. Tvari će postojati kao plin na bilo kojem tlaku ukoliko je temperatura iznad njezine kritične točke. Tablica 4.1 prikazuje kritične točke nekoliko čestih plinova.

Tablica 4.1 Kritične temperature i trojne točke [1]

<i>Plin</i>	<i>Kritična temperatura (°C)</i>	<i>Kritični tlak (bar)</i>	<i>Trojna točka (°C)</i>
Ugljični dioksid	+31	73	-57
Helij	-268	2,26	
Vodik	-240	12,8	-259
Dušik	-147	33,5	-210
Kisik	-119	49,9	-219
Voda	+374	217,7	+0,007

Viskoznost plina se povećava s povećanjem temperature kao što je prikazano slikom 4.1.



Slika 4.1 Povećanje viskoznosti plina sa povećanjem temperature [1]

Izbor plina često nije problem. Obično je to onaj plin koji je trenutno dostupan, i u stvari ogromna većina plinskih ležajeva se podmazuje zrakom. Ukoliko se neki drugi plin koristi u visoko tlačnim sustavima, to je zbog toga jer je vrlo ekonomično koristiti taj plin u tom slučaju. Danas se koristi mnogo plinova u velikim količinama uključujući dušik, kisik, vodik, amonijak, metan i propan. Izuzevši zrak, dva se plina biraju i isporučuju posebno za plinske ležajeve a to su helij i dušik. Dušik je trenutno dostupan i relativno jeftin, bilo stlačen ili ukapljen. Kemijski je vrlo inertan, i zbog toga sigurniji za upotrebu od ostalih trenutno dostupnih plinova kao što su kisik i vodik ili čak stlačeni zrak. Ponekad se koristi za plinske ležajeve koji koriste vanjski tlak, posebice u ispitivačkoj opremi. Helij nije ni trenutno dostupan niti jeftin, ali je čak inertniji od dušika, i ponekad se koristi kod samo-tlačnih plinskih ležajeva u malim zatvorenim sustavima kao što su inercijski žiroskopi. Već je prije rečeno kako bilo koji plin može biti korišten ukoliko ne reagira s materijalima sustava. Naravno, postoji mnogo plinova koji će reagirati sa uobičajenim metalima, no njih normalno nećemo odabrati za plin u ležaju. [1]

4.2 Prednosti i nedostaci plinskih ležajeva

Glavna prednost plinskih ležajeva je već spomenuta, a to je vrlo širok raspon temperatura kod kojih plinovi mogu biti korišteni, od recimo – 200 °C do 2000 °C. U praksi bi bilo vrlo teško konstruirati jednostavni ležaj koji će raditi u rasponu temperatura od čak 500 °C zbog problema toplinskog širenja. Međutim, nije nemoguće. Vrlo visoke i vrlo niske temperature mogu se postići sa krutim mazivima. Odabir između plina ili krutine u principu će biti lagan, s obzirom da su kruta maziva pogodna za male brzine i visoka opterećenja, dok su plinovita maziva pogodna za visoke brzine i mala opterećenja. Uz dopunu, trenje krutih maziva je obično između 0,03 i 0,1, dok je kod plinova premalo da bi ga se moglo odrediti.

Prednosti i nedostaci se mogu sažeti kako slijedi[2]:

Prednosti

- Širok raspon temperatura
- Korisni kod vrlo visokih brzina
- Nema potrebe za posebnom dobavom maziva kod samo-tlačnih plinskih ležajeva
- Mogu raditi u potpuno hermetički zatvorenom okruženju
- Iznimno nisko trenje

Nedostaci

- Mali kapacitet opterećenja koje mogu preuzeti
- Komplicirana detaljna konstrukcija
- Precizna kontrola oblika i potrebna fina obrada površina
- Potrebna opskrba vrlo čistim plinom
- Lako se mogu oštetiti površine ležaja

4.3 Primjeri primjene plinskih ležajeva

4.3.1 Zubarska brusilica

Visokobrzinske brusilice, kakve koriste stomatolozi, imaju plinske tlačne ležajeve i turbinu koju pokreće isti plin koji je potreban ležajevima. Plin koji se primjenjuje je zrak, a njegova priprema vrši se u bezuljnom kompresoru kakav prikazuje slika 4.2. Radni tlak zraka na ulazu

u turbinu je između 2,5 i 2,7 bara. [3]

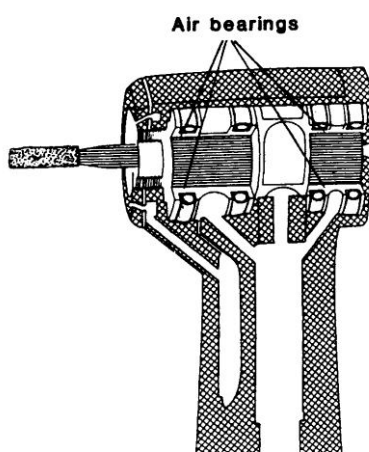


Slika 4.2 Bezuljni kompresor

Brzina vrtnje turbine, odnosno svrdla, iznosi 350 000 o/min, a opterećenje na ležajeve je relativno malo. S obzirom na to, primjena plinskih ležajeva je idealan izbor. Razmještaj ležajeva i turbine u kućištu turbine prikazan je slikom 4.3. Sklop se sastoji od svrdla koji ulazi u šuplje vratilo, na vratilu su lopatice turbine te sa svake strane ležajevi. Na kraju dolazi poklopac kućišta sa udubinom za ležaj.[5]



A



B

Slika 4.3 Raspored elemenata u kućištu turbine zubarskog svrdla

Ležajeve je potrebno dodatno podmazivati posebnim mazivom komercijalnog imena Smioil u obliku spreja, proizvođača „Chirana Medical“. Smioil je mazivo i sredstvo bez mirisa, bez okusa, neotrovno i s antioksidativnim učinkom. Namijenjeno za sve instrumente firme „Chirana Medical a.s.“ koja se uz proizvodnju maziva bavi i proizvodnjom medicinske opreme. Ovo podmazivanje je potrebno raditi jednom dnevno. Slika 4.4 prikazuje sprej i način primjene. Naime, mazivo se nalazi u spremniku pod tlakom, na spremniku postoji priključak koji se spaja sa brusilicom te se otvaranjem ventila propušta mazivo kroz kanale do kućišta turbine i ležajeva. [5]



Slika 4.4 Podmazivanje specifičnim mazivom u obliku spreja

5. ZAKLJUČAK

Prošlo stoljeće i kraj tisućljeća obilježeno je bogatim razvitkom tehnike, tehnologije i materijala maziva. Međutim, zadnje godine prošlog stoljeća pokazale su da nije samo napredak u tehnologiji i ekonomski razvitak od društvenog značaja, nego i očuvanje okoliša i zdravlje ljudi. Štednja energije i prirodnih izvora postala je središnja briga za očuvanje okoliša. Povećana je briga javnosti za maziva, posebno zbog toga što svake godine 40-50% od oko 5 milijuna tona rabljenog maziva, koje uglavnom ima negativan utjecaj na okoliš, završava u okolišu, a ne reciklira se nekom od metoda.

Današnji cilj stručnjaka za podmazivanje je razviti tribološke sustave, manje štetne za okoliš koji će istovremeno imati i visoka radna svojstva. To je moguće ostvariti primjenom novih materijala i prevlaka na dodirnim površinama, kao i primjena novih sustava podmazivanja. U tom smislu kruta i plinovita maziva, u specifičnim uvjetima, imaju prednost nad konvencionalnim mazivima. Potreba za mazivom za primjenu pri ekstremno visokim temperaturama, radijaciji, vakuumu i ostalim ekstremnim okruženjima i uvjetima doveli su do razvitka krutog mazivog filma na dodirnim klizajućim površinama. Osim toga, zahtjevi za podmazivanjem bez buke, s vrlo malim trenjem, i pri enormno velikim brzinama vrtnje te čistoćom u radu doveli su do razvitka podmazivanja plinovitim mazivima.

Dakle, u specifičnim uvjetima, kruta i plinovita maziva mogu pridonijeti boljem očuvanju okoliša, odnosno mogu bolje ispuniti zahtjeve za podmazivanjem od konvencionalnih maziva– ulja i masti.

6. POPIS LITERATURE

- [1] Lansdown, A.R., *Lubrication and Lubricant Selection - A Practical Guide*, Professional Engineering Publishing Limited, London, 2004.
- [2] Mang, T., Dressel, W., *Lubricants and Lubrication*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2007.
- [3] Booser, E.R., *CRC Handbook of Lubrication (Theory and Practice of Tribology)*, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 1983.
- [4] Pedišić, Lj., Maziva, materijali i inženjerstvo podmazivanja, *Goriva i maziva*, 41, 5: 303-344, 2002
- [5] Verčon, J., *Čvrsta (kruta) maziva*, u *Maziva i podmazivanje*, Savez jugoslavenskih društava za primjenu goriva i maziva, Zagreb, 1986. p. 405-410 [6] Use and maintenance handbook: "SKEMA/I" - 301.BE.E99, Castellini, Bologna, Italy, 2002.
- [7] <http://www.halmadent.ro/produse/consumabile/produse-chirana/spray-smioil/#&panel1-3>, (pristup stranici: 20. veljače 2012.)